

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Saša Mraović

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Joško Parunov, dipl. ing.

Student:

Saša Mraović

Zagreb, 2012.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Saša Mraović**

Mat. br.: 35952595

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**USPOREDBA IZRAČUNATIH I IZMJERENIH VALNIH
OPTEREĆENJA KONTEJNERSKOG BRODA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**COMPARISON OF CALCULATED AND MEASURED WAVE
LOADS OF CONTAINERSHIP**

Opis zadatka:

Suvremeni kontejnerski brodovi svojim dimenzijama i operacijskim značajkama izlaze van okvira pravila klasifikacijskih društava za projektiranje i gradnju trgovačkih brodova. Zbog toga je pri njihovom osnivanju potrebno koristiti direktnu proračunske metode. Jedan od najvažnijih direktnih proračunskih postupaka je određivanje valnog opterećenja metodama pomorstvenosti.

U radu je, na osnovi podataka iz literature, potrebno izraditi hidrodinamički model broda poznatog kao Flokstrin kontejnerski brod. Pri tom koristiti program HydroSTAR klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Zatim odrediti prijenosne funkcije njihanja i opterećenja, te dobivene rezultate usporediti s dostupnim izmjerenim vrijednostima s modelskih ispitivanja. Posebnu pažnju posvetiti vertikalnom valnom momentu savijanja na glavnom rebro te relativnom gibanju pramca broda.

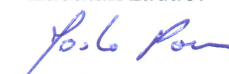
Na kraju je potrebno odrediti dugoročnu razdiobu vertikalnog valnog momenta savijanja za plovidbu Sjevernim Atlantikom. Izračunati najvjerojatniju ekstremnu vrijednost u životnom vijeku broda i usporediti je s IACSovim pravilima.

Zadatak zadan:
4. listopada 2012.

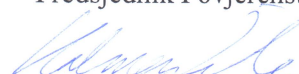
Rok predaje rada:
6. prosinca 2012.

Predviđeni datumi obrane:
12. – 14. prosinca 2012.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Joško Parunov

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Kalman Žiha

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Jošku Parunovu i asistentu Mari Ćorku na savjetima i sugestijama pri izradi rada.

Saša Mraović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD	1
2. PROGRAM HYDROSTAR.....	2
2.1. Matematički model	3
3. ODZIV BRODA NA MORSKIM VALOVIMA.....	8
3.1. Kratkoročna prognoza dvostrukih amplituda odziva	9
3.2. Dugoročna prognoza dvostrukih amplituda odziva	10
4. OPIS ISPITIVANOG MODELA.....	12
5. MODELIRANJE BRODSKOG TRUPA.....	15
6. USPOREDBA REZULTATA.....	17
6.1. Usporedba rezultata HydroSTARa sa rezultatima modelskog ispitivanja i rezultatima Waveship-a.....	17
6.2. Usporedba rezultata HydroSTARa s eksperimentom i linearnom vrpčastom metodom	24
6.3. Određivanje frekvencijski neovisne pogreške modeliranja za različite metode	32
6.4. Dugoročna razdioba vertikalnih momenata savijanja dobivenih s različitim metodama i usporedba ekstremnih vrijednosti s pravilima IACSa.....	42
7. ZAKLJUČAK	44
PRILOZI.....	45
LITERATURA.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz tipičnog panela u z-ravnini	2
Slika 2.	Koordinatni sustavi.....	3
Slika 3.	Idealizacija uronjene površine trupa kontejnerskog broda panelima	7
Slika 4.	Nacrt rebara, kontura pramca i krme	13
Slika 5.	Pozicija uređaja za balansiranje na modelu.....	13
Slika 6.	Hidrostatski podaci dobiveni programom HydroSTAR.....	16
Slika 7.	Prijenosna funkcija poniranja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	18
Slika 8.	Prijenosna funkcija posrtanja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	18
Slika 9.	Prijenosna funkcija relativnog pomaka na pramcu prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	18
Slika 10.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R5 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	19
Slika 11.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R10 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	19
Slika 12.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R15 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	19
Slika 13.	Prijenosna funkcija poniranja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	20
Slika 14.	Prijenosna funkcija posrtanja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	20
Slika 15.	Prijenosna funkcija relativnog pomaka na pramcu prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	20
Slika 16.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R5 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	21
Slika 17.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R10 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	21
Slika 18.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R15 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	21
Slika 19.	Prijenosna funkcija poniranja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	22
Slika 20.	Prijenosna funkcija posrtanja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	22
Slika 21.	Prijenosna funkcija relativnog pomaka na pramcu prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	22
Slika 22.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R5 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	23
Slika 23.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R10 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	23
Slika 24.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R15 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	23
Slika 25.	Prijenosna funkcija poniranja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	25

Slika 26.	Prijenosna funkcija posrtanja prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	26
Slika 27.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R10 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	27
Slika 28.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R10 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	28
Slika 29.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R10 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	29
Slika 30.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R5 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	30
Slika 31.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na R15 prikazana u bezdimenzionalnom dijagramu za $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$ - usporedba HydroSTAR sa drugim metodama	31
Slika 32.	Dugoročna razdioba vertikalnih momenata savijanja	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne značajke broda	14
Tablica 2. Raspodjela masa duž broda	14
Tablica 3. Frekvencijski neovisna pogreška za poniranje pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	32
Tablica 4. Frekvencijski neovisna pogreška za posrtanje pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	33
Tablica 5. Frekvencijski neovisna pogreška za relativno gibanje pramca pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	33
Tablica 6. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R5 pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	34
Tablica 7. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R10 pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	34
Tablica 8. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R15 pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$	35
Tablica 9. Frekvencijski neovisna pogreška za poniranje pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	35
Tablica 10. Frekvencijski neovisna pogreška za posrtanje pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	36
Tablica 11. Frekvencijski neovisna pogreška za relativno gibanje pramca pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	36
Tablica 12. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R5 pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	37
Tablica 13. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R10 pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	37
Tablica 14. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R15 pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$	38
Tablica 15. Frekvencijski neovisna pogreška za poniranje pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	38
Tablica 16. Frekvencijski neovisna pogreška za posrtanje pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	39
Tablica 17. Frekvencijski neovisna pogreška za relativno gibanje pramca pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	39
Tablica 18. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R5 pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	40
Tablica 19. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R10 pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	40
Tablica 20. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R15 pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	m	dubina vode
$f(R)$		Funkcija gustoće vjerojatnosti
h_{bk}	m	Visina ljuljnih kobilica
$i_{j,k}$		Jedinični vektori u smjeru osi x,y,z
k	rad/m	Valni broj
k_{xx}	m	Radijus tromosti za ljuľjanje
k_{yy}	m	Radijus tromosti za posrtanje
l_{bk}	m	Duljina ljuljnih kobilica
n		Vektor normale
n_j		Komponenta vektora normale u smjeru gibanja za j-to njihanje
m_j		Komponenta brzine u smjeru gibanja za j-to njihanje
m_n		Spektralni moment n-tog reda
m_0		Spektralni moment nultog reda
m_1		Spektralni moment prvog reda
m_2		Spektralni momet drugog reda
m_4		Spektralni moment četvrtog reda
p	N/m ²	Tlak
r		Radij vektor
t	m	Trim broda
t	s	Vrijeme
x	m	Uzdužni položaj
v	m/s	Vektor brzine strujanja fluida
v_x	m/s	Komponenta brzine u smjeru osi x
v_y	m/s	Komponenta brzine u smjeru osi y
v_z	m/s	Komponenta brzine u smjeru osi z
z	m	Amplituda poniranja
$[A_{jk}]$		Matrica koeficijenata dodatne mase
B	m	Širina broda
$[B_{jk}]$		Matrica koeficijenata prigušenja
C_B		Blok koeficijent
$C_I(n)$		Normalizacijska funkcija
$[C_{jk}]$		Matrica koeficijenata povratne hidrostatske sile
D	m	Visina broda
D_p	m	Promjer propelera
D_{ss}		Trajanje stanja mora
F	N	Hidrodinamička sila
$F(R)$		Funkcija distribucije vjerojatnosti
F_n		Froudeov broj
$\{F_j\}$	N	Vektor opterećenja
GM	m	Metacentarska visina
$G(\omega, \beta)$		Funkcija raspršivanja
$H(\omega_i)$		Izračunate vrijednosti prijenosne funkcije kod diskretne frekvencije ω_i

$H_{eks}(\omega_i)$		Izmjerene vrijednosti prijenosne funkcije kod diskretne frekvencije ω_i
KG	m	Težište broda mjereno od osnovice
L_{CG}	m	Težište broda po dužini mjereno od rebra 10
Loa	m	Duljina broda preko svega
L_{pp}	m	Duljina broda između perpendikulara
M	Nm	Hidrodinamički moment
M_{BV}	Nm	Vertikalni moment savijanja
M_W	Nm	Srednji moment savijanja na sredini broda
$M_{W,H}$	Nm	Moment savijanja na sredini broda na valnom brijegu
$M_{W,S}$	Nm	Moment savijanja na sredini broda na valnom dolu
$[M_{jk}]$	kg	Matrica mase
$R_{1/3}$	m	Značajna vrijednost
RAO		Operator amplitude odziva
S_R		Spektar odziva
$S_w(\omega)$	m^2/s	Spektar valova
T	m	Gaz broda
T_m	s	Srednji valni period
T_R	god.	Povratni period
T_z	s	Period nultog presjeka
T_z	s	Prirodni period za poniranje
T_ϕ	s	Prirodni period za ljuljanje
T_θ	s	Prirodni period za posrtanje
U		Ukupni potencijal strujanja
α		Parametar oblika
β	°	Kursni ili susretni kut
$\{\delta_j\}$	m	Vektor pomaka
ε		Parametar širine spektra
λ	m	Valna duljina
μ	°	Smjer nailaska valova
ρ	kg/m ³	Gustoća fluida
ζ	m	Elevacija vala
ζ_a	m	Amplituda vala
ω	s ⁻¹	Valna frekvencija
ω_e	s ⁻¹	Susretna frekvencija
ϕ		Potencijal brzine strujanja
ϕ	°	Amplituda posrtanja
ϕ		Frekvencijski neovisna pogreška
ϕ_S	ms ⁻¹	Stacionarni perturbacijski potencijal
ϕ_T	ms ⁻¹	Vremenski ovisan perturbacijski potencijal
ϕ_0		Potencijal brzine strujanja nailaznog vala
ϕ_7		Potencijal difrakcije
$\Gamma(n)$		Gamma funkcija
\mathcal{G}	s	vrijeme
θ		Parametar skaliranja
$\Sigma\phi_j$		Potencijali radijacije

Ψ		Parametar rizika
∇	m^3	Volumen istisnine

SAŽETAK

U radu su određeni linearni odzivi velikog kontejnerskog broda na harmonijskim valovima. Korišten je program za hidrodinamičku analizu HydroSTAR klasifikacijskog društva Bureau Veritas, koji je zasnovan na 3D panel metodi. Rezultati su uspoređeni s dostupnim izmjerenim vrijednostima modelskog ispitivanja [9] te s rezultatima dobivenim programom za primjenu vrpčaste metode Waveship, klasifikacijskog društva Det Norske Veritas [10]. Uspoređivani su odzivi poniranja, posrtanja, relativnog gibanja i vertikalnih valnih momenata savijanja.

U radu su također određene i prikazane frekvencijski neovisne pogreške modeliranja koje su zanimljive za komparativnu analizu točnosti različitih metoda pomorstvenosti. Napravljena je i usporedba dugoročnih razdioba vertikalnih valnih momenta savijanja dobivenih različitim metodama kao i usporedba ekstremnih vrijednosti s pravilima IACSa.

1. UVOD

Valovi su jedan od glavnih uzroka opterećenja brodske konstrukcije. Procjena odziva broda na morskim valovima je važna zbog kriterija njihanja obzirom na zahtjeve udobnosti plovidbe te sigurnosti posade, broda i tereta.

Određivanje odziva broda na valovima je složen zadatak zbog velikog broja varijabli i pretpostavki koje daju samo približno rješenje, unatoč relativno kompliciranom matematičkom modelu koji se pri tom koristi. Stoga je važno rezultate numeričkih metoda usporediti s modelskim ispitivanjima kako bi se procijenila točnost programskih alata koji se koriste.

U ovom radu su uspoređeni rezultati dobiveni programom HydroSTAR s rezultatima eksperimentalnog ispitivanja koje je dokumentirao C.Flokstra [9], kao i rezultatima dobivenim programom Waveship koje je izračunala kolegica Morana Hitrec u svom diplomskom radu [10]. Program HydroSTAR je zasnovan na 3D panel metodi za određivanje njihanja broda na valovima, dok program Waveship koristi vrpčastu metodu.

Razmatrana su gibanja i globalna opterećenja izazvana valovima za kontejnerski brod s konstantnom brzinom napredovanja. Uspoređeni su rezultati za poniranje, posrtanje, relativni pomak pramca i vertikalni moment savijanja.

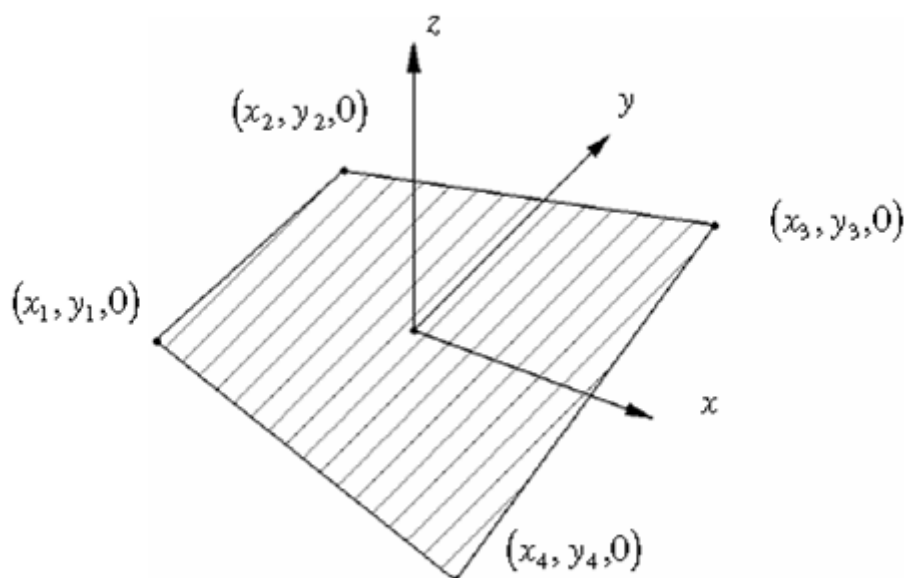
U sklopu rada su izračunate i frekvencijski neovisne pogreške modeliranja koje su zanimljive za analizu točnosti različitih pristupa određivanja odziva kontejnerskog broda na valovima.

Na kraju je određena i dugoročna razdioba vertikalnih valnih momenata savijanja na osnovi prijenosnih funkcija dobivenih 3D metodom, vrpčastom metodom i eksperimentima. Usporedba dugoročnih razdioba je najpouzdanija metoda određivanja relativne točnosti pojedinih metoda. Također je određena i dugoročna razdioba vertikalnog valnog momenta savijanja prema uputama Međunarodne udruge klasifikacijskih društava (International Association of Classification Societies - IACS) [1], te je dobivena ekstremna vrijednost uspoređena s projektnom vrijednošću iz pravila klasifikacijskih društava [11].

2. PROGRAM HYDROSTAR

Programski paket HydroSTAR za izračun hidrodinamičkih uzbuda i reakcije rabi 3D panel metodu. Porast procesorske snage računala je omogućio razvoj ove vrste metode za rješavanje problema pomorstvenosti u tri dimenzije. Prednost joj je u tome što za razliku od vrpčaste metode opisuje stvarni oblik tijela, te što se s gušćom mrežom panela postiže veća točnost. Upravo gustoća mreže koja zahtijeva i veliku raspoloživost računalne memorije bila je jedan od ograničavajućih faktora za širu primjenu metode.

Panel metoda je trodimenzionalna numerička metoda koja diskretizirajući tijelo pomoću konačnog broja panela pokušava zadovoljiti Laplaceovu jednadžbu u domeni fluida distribuirajući izvore i dipole nepoznate jakosti po površini panela [4].



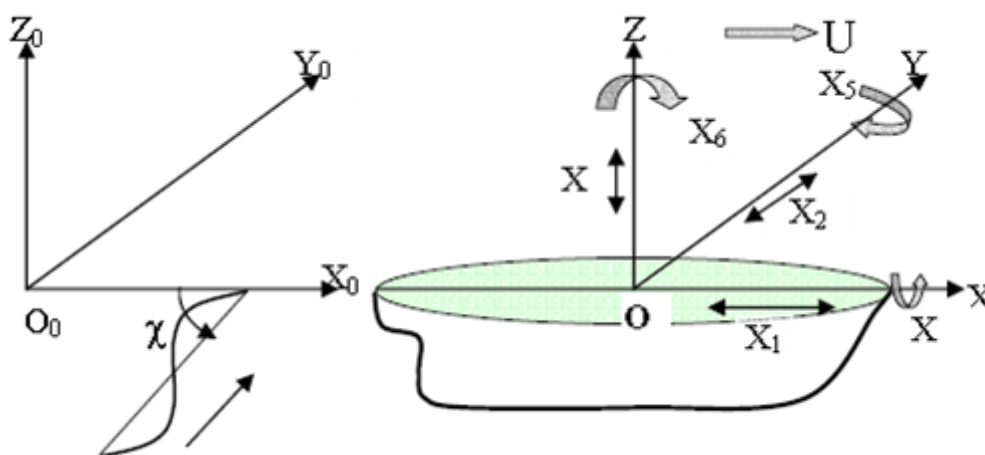
Slika 1. Prikaz tipičnog panela u z-ravnini

Rubni uvjeti primijenjeni na ovu vrstu problema se lineariziraju, te uz primjenu Greenove funkcije i rubnih uvjeta se određuje relacija između iznosa potencijala brzine strujanja i normalne komponente brzine na svakom panelu s jakosti izvora i dipola na svakom panelu.

Hidrodinamičke sile se tada određuju integracijom tlaka po površini tijela te se primjenjujući Newtonov zakon mogu odrediti pripadajuća njihanja.

2.1. Matematički model

Ova metoda pretpostavlja linearnu potencijalnu teoriju za proračun hidrodinamičke uzbude i reakcije. Položaj promatranog tijela opisuju dva desnokretna koordinatna sustava. Koordinatni sustav broda s ishodištem u težištu i nepomični koordinatni sustav vezan uz Zemlju.



Slika 2. Koordinatni sustavi

Osnovne pretpostavke koju potencijalna teorija mora zadovoljiti je da je razmatrani fluid idealna homogena, neviskozna, nestlačiva tekućina te da je strujanje bezvrtložno. Uvjet bezvrtložnosti je zadovoljen ako je međusobni odnos promjena komponenti brzine strujanja u prostoru jednak nuli što se može izraziti kao

$$\left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) k = 0 \quad (1)$$

odnosno

$$\nabla \times \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

Polje brzina u takvom modelu se može opisati skalarnom funkcijom potencijala brzine strujanja $\Phi(x,y,z;t)$ te se stoga strujanje često naziva potencijalnim. Potencijal brzine strujanja $\Phi(x,y,z;t)$ je matematički izraz koji ima svojstvo da je komponenta brzine u točki fluida u bilo kojem odabranom smjeru zapravo njegova derivacija u tom smjeru za odabranu točku. Funkcija potencijala brzine je apstraktna matematička funkcija bez stvarnog fizikalnog značenja.

Jednadžba kontinuiteta (neprekidnosti) ili zakon o održavanju mase definira kontinuitet mase fluida, tj. uvjet da u fluidu ne postoji neispunjeni prostor. Izraz za jednadžbu kontinuiteta u općem obliku glasi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

Uz pretpostavku nestlačivosti idealne tekućine što znači da ukupna promjena protoka mora biti jednaka nuli, jednadžba kontinuiteta postaje

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \Delta \Phi = 0 \quad (4)$$

što je poznato kao Laplaceova jednadžba, gdje je

\mathbf{v} -vektor brzine strujanja

Φ -potencijal brzine strujanja

Vrlo važno svojstvo Laplaceove jednadžbe jest da je zbroj bilo koja dva rješenja te jednadžbe također rješenje te jednadžbe. To znači da se strujanje može prikazati zbrojem raspoređenih singulariteta čije vrijednosti se nalaze uz odgovarajući rubni uvjet.

U općem slučaju potencijal brzine strujanja harmonijskog vala dan je izrazom

$$\Phi_0(x, z, t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh(k \cdot d)} \sin(kx - \omega t) \quad (5)$$

Za brod koji nailazi na valove s nekom brzinom U ukupni potencijal brzine strujanja glasi

$$\Phi(x, y, z, t) = \left[(-Ux + \phi_s(x, y, z)) + \phi_T(x, y, z) e^{-i\omega t} \right] \quad (6)$$

U izrazu (6) prvi dio izraza predstavlja vremenski neovisni doprinos brzine U , a drugi dio predstavlja vremenski ovisan doprinos ukupnom potencijalu brzine strujanja.

Komponente vremenski ovisnog dijela se sastoje od

Φ_0 - potencijal nailaznog vala

Φ_7 -potencijal difrakcije

$\sum \Phi_j$ -potencijali radijacije

Vremenski ovisan dio se sastoji od osam komponenti: potencijala nailaznog vala, potencijala difrakcije i šest potencijala radijacije.

Svaki od navedenih potencijala mora zadovoljiti Laplaceovu jednadžbu. Uvođenjem rubnih uvjeta nalazi se zadovoljavajuće rješenje za svaki pojedinačni potencijal. Međutim, za Φ_7 i Φ_j rješenje se mora potražiti numerički. Potencijali difrakcije i radijacije mogu se izraziti preko Greenove funkcije koja zadovoljava rubne uvjete na slobodnoj površini i dnu te uvjet radijacije na dovoljnoj udaljenosti od tijela. Preostali rubni uvjeti se svode na uvjet oplakane površine. Da bi se sustav jednadžbi mogao izračunati, oplakana površina se podijeli na panele te sustav integralnih jednadžbi postaje sustav algebarskih jednadžbi koje kao rezultat daju raspodjelu gustoće izvora na panelu.

Rubni uvjet se mogu izraziti kao

- linearizirani rubni uvjet na slobodnoj površini

$$\left[\left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) + g \frac{\partial}{\partial z} \right] \phi_r = 0 \text{ na } z = 0 \quad (7)$$

- rubni uvjet na dnu

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial z} = 0 \text{ na } z = -d \quad (8)$$

- rubni uvjet na oplakanoj površini

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} + \frac{\partial \phi_7}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega_e n_j + m_j$$

gdje je

n_j -komponenta vektora normale u smjeru gibanja za j -to njihanje

m_j -komponenta brzine u smjeru gibanja za j -to njihanje

Nakon izračunavanja potencijala brzine mogu se odrediti polja tlakova pomoću Bernoullijeve jednadžbe

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = C(t) \quad (10)$$

Sile i momenti koje djeluju na tijelo računaju se integriranjem dobivenih tlakova po oplakanoj površini

$$F = - \iint_S np dS \quad (11)$$

$$M = - \iint_S r \times np dS \quad (12)$$

gdje \mathbf{n} predstavlja jedinični vektor normale, \mathbf{r} radijvektor od referentne točke.

Odziv broda na valovima u frekvencijskoj domeni je opisan sustavom masa, prigušenja, opruga. Pretpostavljajući linearni sustav s šest stupnjeva slobode gibanja jednačba gibanja glasi

$$\left(-\omega_e^2 \left([M_{jk}] + [A_{jk}] \right) + i\omega_e [B_{jk}] + [C_{jk}] \right) \{\delta_j\} = \zeta_a \{F_j\} \quad (13)$$

gdje su

$[M_{jk}]$ -matrica mase

$[A_{jk}]$ -matrica koeficijenata dodatne mase

$[B_{jk}]$ -matrica koeficijenata prigušenja

$[C_{jk}]$ - matrica koeficijenata povratne hidrostatičke sile

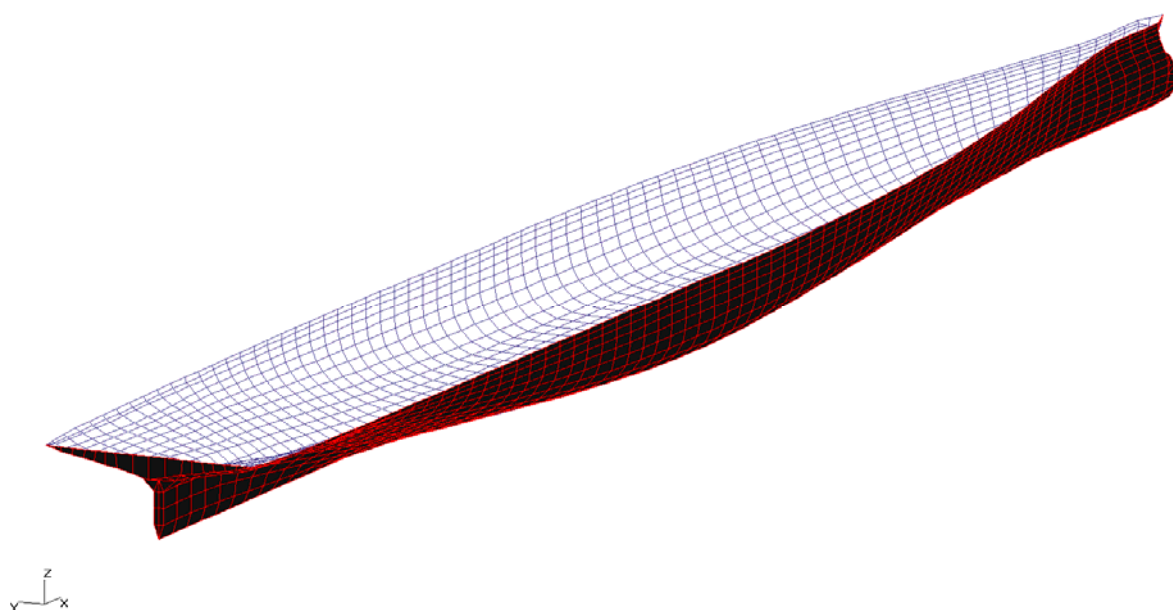
$\{\delta_j\}$ -vektor pomaka

$\{F_j\}$ -vektor opterećenja

Programski paket HydroSTAR [5] rabi gore opisan postupak za proračun opterećenja i gibanja.

Definiranjem ulazne datoteke s podacima o geometriji forme broda, program HydroSTAR pomoću modula „hslec“ diskretizira formu panelima. Nakon toga potrebno je formi zadati distribuciju mase modulom „hstat“ te je dovesti u hidrostatičku ravnotežu.

Modulom „hsrdf“ računaju se koeficijenti radijacije i difrakcije. Potom se modulom „hsmec“ rješava jednačba gibanja broda te se na kraju određivanje željenog tipa i lokacije modulom „hsrao“ konstruiraju prijenosne funkcije.



Slika 3. Idealizacija uronjene površine trupa kontejnerskog broda panelima

3. ODZIV BRODA NA MORSKIM VALOVIMA

Odziv broda na morskim valovima određuje se spektralnom analizom pomoću programa Starspec [6]. Za spektar gustoće energije $S_w(\omega)$ distribuiranu po valnoj frekvenciji i prijenosnu funkciju $RAO(\omega)$, gustoća spektralne energije odziva se može napisati kao

$$S_R(\omega) = RAO^2(\omega) \cdot S_w(\omega) \quad (14)$$

dok se spektralni moment n -tog reda m_n može zapisati kao

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_R(\omega) d\omega \quad (15)$$

ako se razmatra utjecaj kursa, odnosno smjera nailaska valova na spektralne momente onda kao

$$m_n = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_w(\omega, \vartheta) \cdot RAO^2(\omega, \vartheta) d\omega \quad (16)$$

Spektralnim momentima se mogu izračunati neke karakteristične vrijednosti procesa kao npr. srednji valni period T_m , period nultog presjeka T_z te parametar širine spektra ε dok nulti spektralni moment m_0 ujedno predstavlja i varijancu procesa σ^2 .

$$T_m = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (17)$$

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (19)$$

Da bi se opisala kutna distribucija energije valova $S_w(\omega, \beta)$ to jest da bi se u obzir uzeli kratko bregoviti valovi uvodi se funkcija raspršivanja $G(\omega, \beta)$ koja mora zadovoljiti relaciju

$$\int_0^{2\pi} G(\omega, \beta) d\beta = 1 \text{ gdje je} \quad (20)$$

β smjer nailaska vala.

Sada se spektar energije valova može zapisati kao umnožak (14) i (20)

$$S(\omega, \beta) = S(\omega) \cdot G(\omega, \beta) \quad (21)$$

Zbog jednostavnosti uzima se da je $G(\omega, \beta) = G(\beta)$ te se funkcija $G(\beta)$ definira kao

$$G(\beta) = C_1(n) \cos^n(\beta) \quad (22)$$

$C_1(n)$ predstavlja faktor normalizacije i određen je pomoću Gamma funkcije.

$$C_1(n) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right)}{\sqrt{\pi} \left(\frac{n}{2} + \frac{1}{2}\right)} \quad (23)$$

Prema preporuci IACS-a [1] uzima se da je faktor $n = 2$.

3.1. Kratkoročna prognoza dvostrukih amplituda odziva

Za proračun kratkoročnog odziva, pod kratkoročnim stanjem mora smatra se stanje mora koje traje od nekoliko minuta do nekoliko sati, uz pretpostavku da je proces uskopojan $\varepsilon \rightarrow 0$. Nadalje se pretpostavlja da distribucija slučajne varijable R dvostruke amplitude, prati Rayleighovu distribuciju vjerojatnosti (24).

$$f(R) = \frac{R}{4m_0} \exp\left(-\frac{R^2}{8m_0}\right) \quad (24)$$

Integracijom funkcije distribucije vjerojatnosti izražava se funkcija gustoće vjerojatnosti

$$F(R) = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{8m_0}\right) \quad (25)$$

Značajni odziv $R_{1/3}$ se računa kao

$$R_{1/3} = 4\sqrt{m_0} \quad (26)$$

Maksimalna vrijednost odziva kratkoročnog stanja mora $R_{\max}(D_{SS}, \alpha)$ trajanja D_{SS} nepremašena u N ciklusa zapažanja, uz funkciju gustoće vjerojatnosti $P(R)$ (27), se može zapisati kao (28):

$$P(R) = \left(1 - \exp\left(-\frac{R^2}{8m_0}\right)\right)^N \quad (27)$$

$$R_{\max}(D_{SS}, \psi) = 2 \sqrt{2m_0 \ln \left(\frac{-1}{(1-\psi)^{1/N} - 1} \right)} \quad (28)$$

gdje je ψ parametar rizika (29)

$$\psi = 1 - P(R) \quad (29)$$

3.2. Dugoročna prognoza dvostrukih amplituda odziva

Metoda određivanja dugoročne razdiobe amplituda [7] sastoji se u određivanju kratkoročne razdiobe za razna stanja mora, te množenju tako dobivenih vjerojatnosti s vjerojatnostima pojavljivanja kratkoročnih stanja mora. Razdioba vjerojatnosti slučajne varijable R za vrijeme trajanja kratkoročnog stanja mora određenog značajnom valnom visinom $H_{1/3}$ i nultim valnim periodom T_z ravna se po Rayleighevoj razdiobi vjerojatnosti:

$$F(R) = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{8m_0}\right) \quad (30)$$

Rayleigheva razdioba predstavlja uvjetnu razdiobu valnih amplituda budući je ona ovisna o vjerojatnosti pojavljivanja određenog stanja mora. Sama dugoročna razdioba valnih amplituda računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$F_W(R) = \sum_{j,k}^{n_H, n_T} F_R(R|H_{sj}, T_{zk}) N_k(T_{zk}) p_{jk}(H_{sj}, T_{zk}) \quad (31)$$

U izrazu (31), $p_{jk}(H_{sj}, T_{zk})$ predstavlja vjerojatnost pojavljivanja kratkoročnog stanja mora koje je definirano j -tom po redu značajnom valnom visinom H_{sj} , te k -tim nultim valnim periodom T_{zk} . Ta se vjerojatnost dobiva iz tablice stanja mora. Varijabla $N_k(T_{zk})$ koja se pojavljuje u izrazu (31) predstavlja omjer prosječnog nultog valnog perioda za sva stanja mora i nultog valnog perioda k -tog stanja mora T_{zk} :

$$N_k(T_{zk}) = \frac{\bar{T}_z}{T_{zk}} \quad (32)$$

Prosječni nulti valni period svih stanja mora dobiva se po definiciji kao:

$$\bar{T}_z = \left(\sum_k^{n_T} \frac{1}{T_{zk}} p_k(T_{zk}) \right)^{-1} \quad (33)$$

Varijablom $N_k(T_{zk})$ uzima se u obzir relativni broj valnih ciklusa koji nastupaju u k -tom stanju mora. Poznavajući prosječni nulti valni period \bar{T}_z možemo izračunati očekivani broj valova u zadanom povratnom razdoblju T_R kao:

$$N = \frac{T_R}{\bar{T}_z} \quad (34)$$

Zatim je potrebno na dobivene diskretne vrijednosti prilagoditi Weibullovu dvoparametarsku razdiobu:

$$F_w(R) = 1 - \exp\left(-\frac{R}{\theta}\right)^\alpha \quad (35)$$

gdje je θ parametar skaliranja, a α parametar oblika. Vrijednost dvostruke amplitude $R_{N,\max}^{\text{mod}}$ koja zadovoljava sljedeću jednakost :

$$F_w(R_{N,\max}^{\text{mod}}) = 1 - \frac{1}{N} \quad (36)$$

predstavlja najvjerojatniju ekstremnu dvostruku amplitudu u povratnom razdoblju T_R .

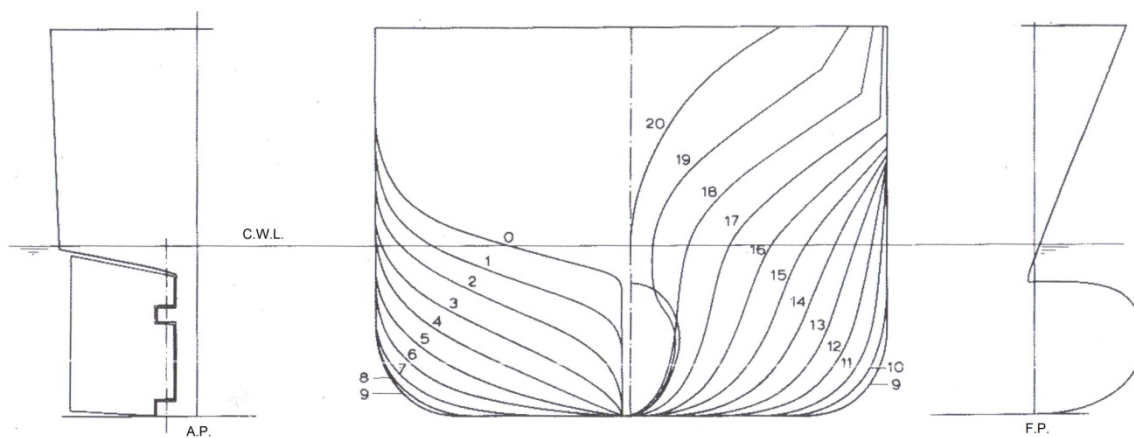
4. OPIS ISPITIVANOG MODELA

Kontejnerski brod čije su glavne karakteristike dane u tablici 1., a nacrt rebara prikazan na slici 4., ispitan je u Laboratoriju za pomorstvenost N.S.M.B. (Seakeeping Laboratory of the Netherlands Ship Model Basin). Model je izgrađen u mjerilu 1:55 od staklom pojačanog poliestera i sastojao se od četiri segmenta spojena s tri pet-komponentnih mjernih traka. Pukotine između segmenata su zabrtvljenje ljepljivim trakama. Mjerne trake su postavljene na rebra 5 (krmeni dio broda), 10 (sredina broda) i 15 (pramčani dio broda). Raspored masa za balansiranje je prikazan na slici 5.. Svaki segment je uravnotežen pomoću stola male mase i vješanjem utega na 2 niti. Model je bio opremljen ljuljnim kobilicama i samostalno pogonjen za vrijeme pokusa i imajući mogućnost slobodnog gibanja. Kurs je održavan pomoću kormila kontroliranog autopilotom.

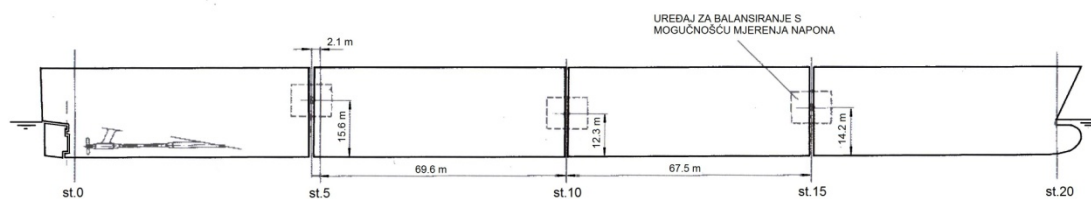
Značajke mjerene za vrijeme ispitivanja su bile:

- vertikalni i horizontalni moment savijanja, smične sile i torzioni momenti mjereni pet-komponentnim mjernim trakama pričvršćenim na tri sekcije
- poniranje, mjereno vertikalnom laganom šipkom koja je pokretala potencijometar
- posrtanje i ljuljanje, snimano žiroskopom
- relativno gibanje na pramcu i krmi dobiveno mjernom sondom pričvršćenom vertikalno na model

Ispitivanja modela su provedena pri smjerovima nailaska na valove $\mu = 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 180^\circ, 205^\circ, 225^\circ, 245^\circ$ (180° označava smjer valova u pramac). Korišteni su omjeri duljine vala naspram duljini broda $\lambda/L = 0.35, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 1.1$ i 1.4 . Visina vala je držana konstantnom na $1/60 L$. Istraživane su brzine izražene Froudeovim brojem $F_n = 0.22, 0.245, 0.27$.



Slika 4. Nacrt rebara, kontura pramca i krme



Slika 5. Pozicija uređaja za balansiranje na modelu

Naziv	Simbol	Jedinica	Brod
Duljina preko svega	L_{oa}	m	284.000
Duljina između perpendikulara	L_{pp}	m	270.000
Širina	B	m	32.200
Visina	D	m	18.662
Gaz	T	m	10.850
Trim	t	m	0.000
Voumen istisnine	∇	m ³	56097
Blok koeficijent	C_B	-	0.598
Težište broda mjereno od osnovice	KG	m	13.490
Metacentarska visina	GM	m	1.150
Težište broda mjereno od rebra 10	L_{CG}	m	-10.120
Radijust tromosti za ljuljanje	k_{xx}	m	12.075
Radijust tromosti za posrtanje	k_{yy}	m	66.960
Prirodni period za ljuljanje	T_ϕ	s	24.900
Prirodni period za posrtanje	T_θ	s	8.600
Prirodni period za poniranje	T_z	s	8.700
Duljina ljuljnih kobilica	l_{bk}	m	47.000
Visina ljuljnih kobilica	h_{bk}	m	0.480
Promjer propelera	D_p	m	6.560

Tablica 1. Glavne značajke broda

Segment	Masa [t]	Položaj težišta		Radijus tromosti	
		Uzdužno od AP [m]	Vetikalni od osnovice [m]	Ljuljanje[m]	Posrtanje [m]
1	11788	33.96	15.28	9.7	19.9
2	18594	99.02	12.41	13.8	22.1
3	17746	168.11	12.19	12.1	20.6
4	7604	228.51	16.43	9.7	20

Tablica 2. Raspodjela masa duž broda

5. MODELIRANJE BRODSKOG TRUPA

Na osnovu nacrtu rebara je definirana ulazna datoteka s podacima o geometriji oplakane površine za program HydroSTAR (datoteke Flokstra.hul i Flokstra.mri). Zatim se pomoću modula "hslec" diskretizira oplakana površina panelima. Nakon toga je potrebno zadati distribuciju mase modulom "hstat" te je dovesti u hidrostatičku ravnotežu. Modulom "hsrdf" se računaju koeficijenti difrakcije i radijacije. Modul "hsmec" rješava jednačbe gibanja broda, a prijenosne funkcije se konstruiraju prema željenom tipu i lokaciji modulom "hsrao".

U proračunu kojeg smo napravili prikazujemo podatke za brzinu napredovanja koja odgovara Froudeovom broju $F_n = 0.245$, i za kuteve nailaska broda na valove $\mu = 45^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ ($\mu = 0^\circ$ označava valove u krmu).

Slika 6. prikazuje hidrostatske podatke dobivene programom HydroSTAR.

```

HStat - Hydrostatic-property computations.
Project: Mesh exported from Femap
User :
Nb of bodies to be analysed      1
Nb symmetry of hull geometry    0
Nb panels on hulls              2099
Nb segments along waterlines    164
Nb panels over waterplanes      459
Nb panels over the free surface  0

# Mass from distribution      : 0.575000E+08
# Mass volume (rho=1025.0)   : 0.576661E+08
# Difference                  : -0.166105E+06 ==-0.29%

# Xcdg from distribution XG : 123.66836
# Xcenter of volume XB : 123.66827
# Difference                  : 0.00010

# Ycdg from distribution YG : 0.00000
# Ycenter of volume YB : -0.00158
# Difference                  : 0.00158

# Zcdg from distribution ZG : 2.64801 = 13.49801 From keel
# Zcenter of volume ZB : -4.67345
# GB=ZB-ZG : -7.32146

# BM x_direction : 581.15890
# BM y_direction : 9.10052
# GB + BMy = GM44 : 1.77907
# GB + BMx = GM55 : 573.83745

Correction to mass distribution (return=Yes) ?

# Mass from distribution      : 0.576661E+08
# Mass volume (rho=1025.0)   : 0.576661E+08
# Difference                  : 0.000000E+00 = 0.00%

# Xcdg from distribution XG : 123.66827
# Xcenter of volume XB : 123.66827
# Difference                  : 0.00000

# Ycdg from distribution YG : 0.00000
# Ycenter of volume YB : -0.00158
# Difference                  : 0.00158

# Zcdg from distribution ZG : 2.64801 = 13.49801 From keel
# Zcenter of volume ZB : -4.67345
# GB=ZB-ZG : -7.32146

# BM x_direction : 581.15890
# BM y_direction : 9.10052
# GB + BMy = GM44 : 1.77907
# GB + BMx = GM55 : 573.83745

# Constants used in computations
# Reference length : 1.000
# Water density (rho) : 1025.000
# Gravity acceleration : 9.810

# BODY No.1
# REFERENCE POINT : < 123.668 -0.002 -4.673>
# BUOYANT CENTER : < 123.668 -0.002 -4.673>
# HULL VOLUME : 0.56260E+05 m³
# HULL SURFACE : 0.10825E+05 m²

# WATERPLANE AREA : 0.70074E+04 m²
# Ctre : < 110.796 0.000>
# Ixx : 0.51356E+06 BMxx 9.12840
# Ixy : -0.14238E+03 BMxy -0.00253
# Iyy : 0.32700E+08 BMyy 581.23497

```

Slika 6. Hidrostatski podaci dobiveni programom HydroSTAR

Vidimo da se podaci dobiveni programom HydroSTAR dobro slažu s ciljanim vrijednostima, što znači da je forma broda ispravno i točno modelirana.

6. USPOREDBA REZULTATA

6.1 Usporedba rezultata HydroSTARa s rezultatima modelskog ispitivanja i rezultatima Waveshipa

Programom HydroSTAR su određene prijenosne funkcije za smjerove valova $\mu = 45^\circ$, 135° , 180° ($\mu = 0^\circ$ označava valove u krmu) i brzinu za Froudeov broj $F_n = 0.245$. Za iste valne frekvencije kao kod modelskog ispitivanja, izračunate su amplitude poniranja, posrtanja, relativnog gibanja, momenata savijanja na 5, 10, 15 teoretskom rebru i prikazana je usporedba rezultata za sve tri metode.

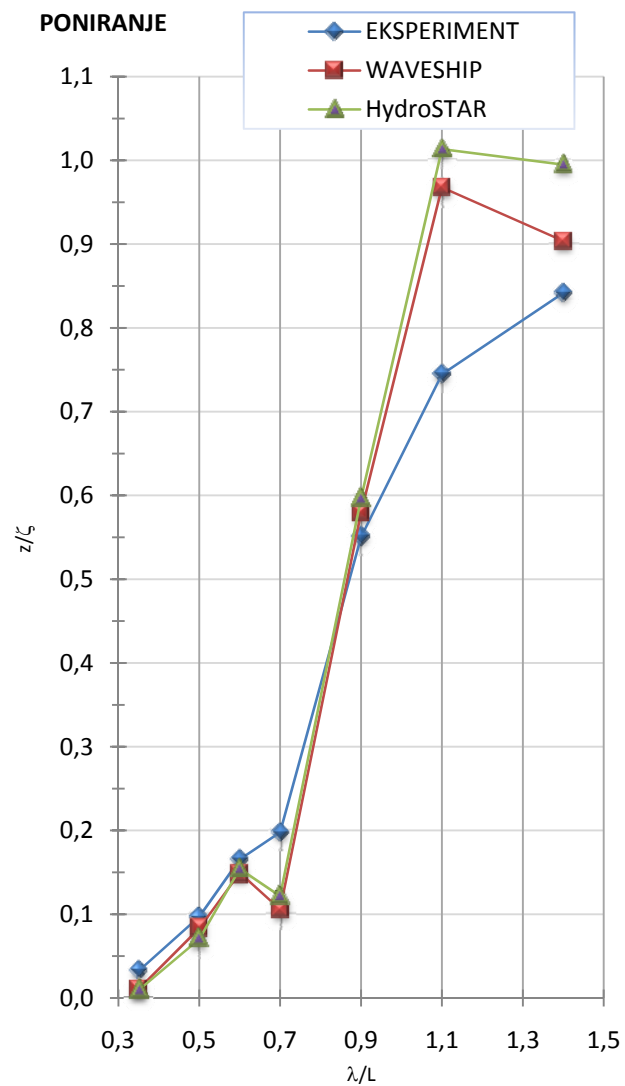
Prijenosne funkcije su prikazane u bezdimenzionalnim dijagramima na slikama 7. do 24.. U dijagramima su prikazane prijenosne funkcije izračunatih amplituda odziva broda u ovisnosti o omjeru valne duljine λ i duljine broda L . Prijenosne funkcije su prikazane za tri smjera nailaska valova $\mu = 45^\circ$ (valovi bočno u krmu), $\mu = 135^\circ$ (valovi bočno u pramac) i $\mu = 180^\circ$ (valovi u pramac).

Poniranje z i relativno gibanje s je izraženo bezdimenzionalno u omjeru s valnom amplitudom ζ , posrtanje ϕ s izrazom $2\pi\zeta/\lambda$, a momenti savijanja s izrazom $\rho\zeta gBL^2$, gdje su ρ gustoća vode, ζ valna amplituda, g ubrzanje sile teže, B širina broda, a L duljina broda.

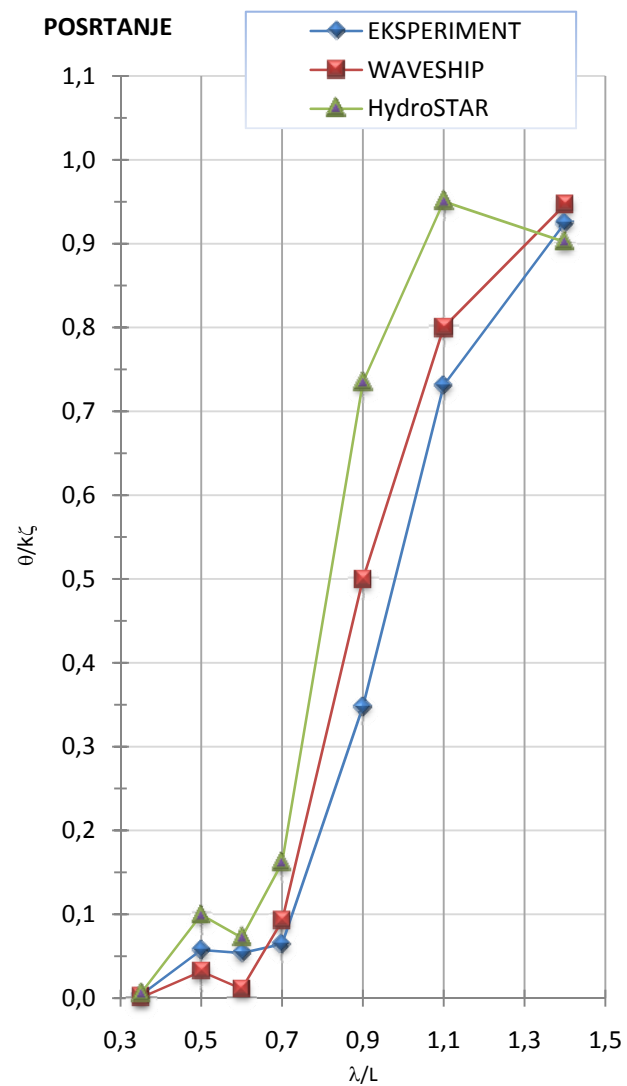
Razlike između izmjerenih i izračunatih prijenosnih funkcija su u prihvatljivim granicama.

$\mu = 180^\circ$ (valovi u pramac)

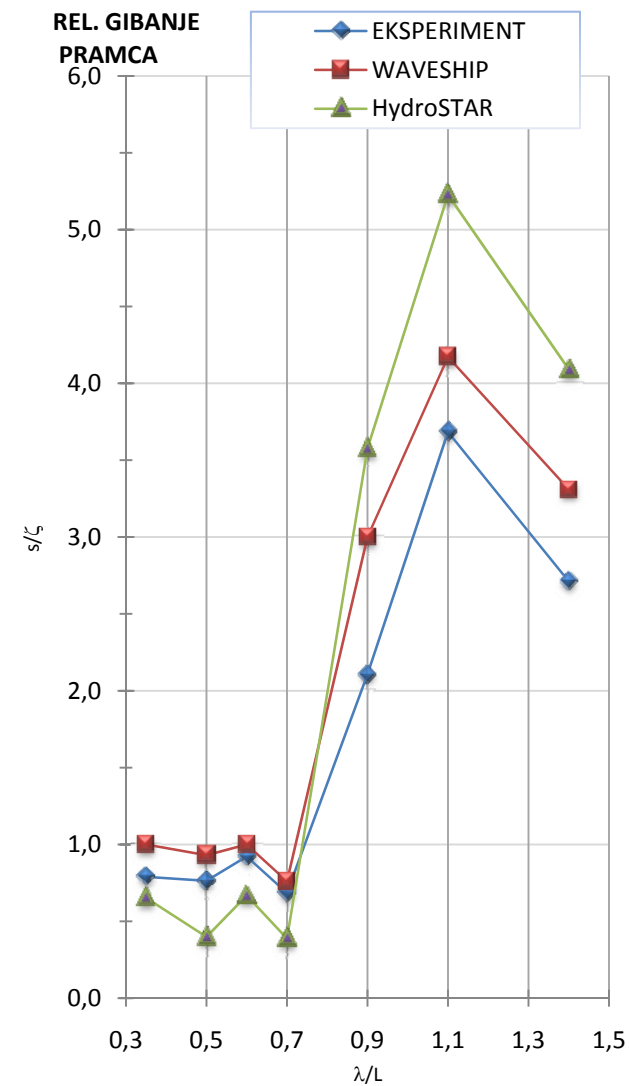
$Fn = 0.245$



Slika 7.



Slika 8.

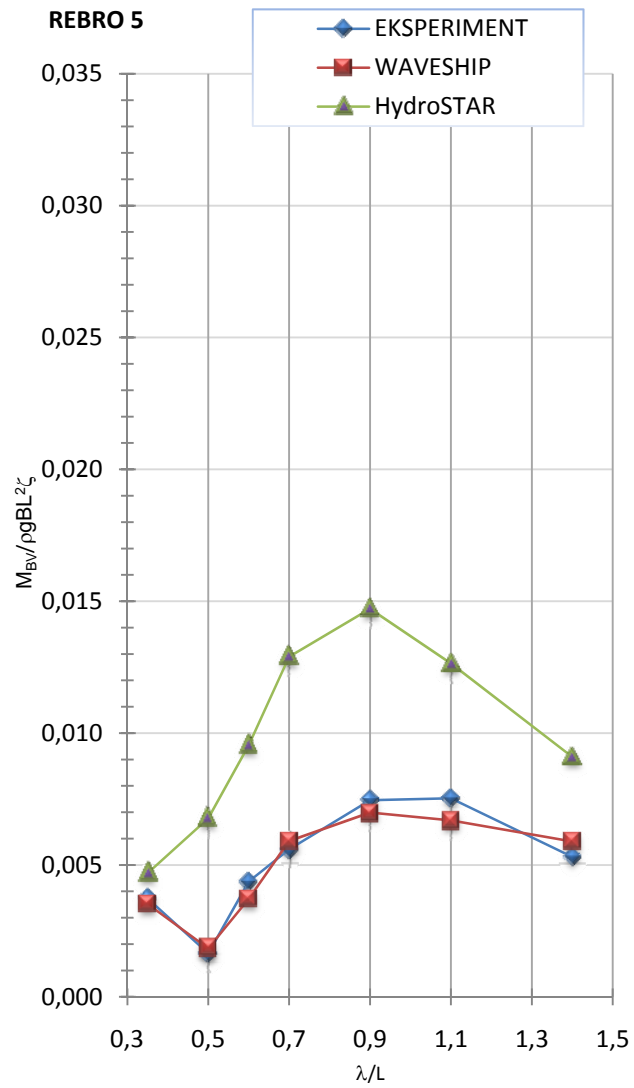


Slika 9.

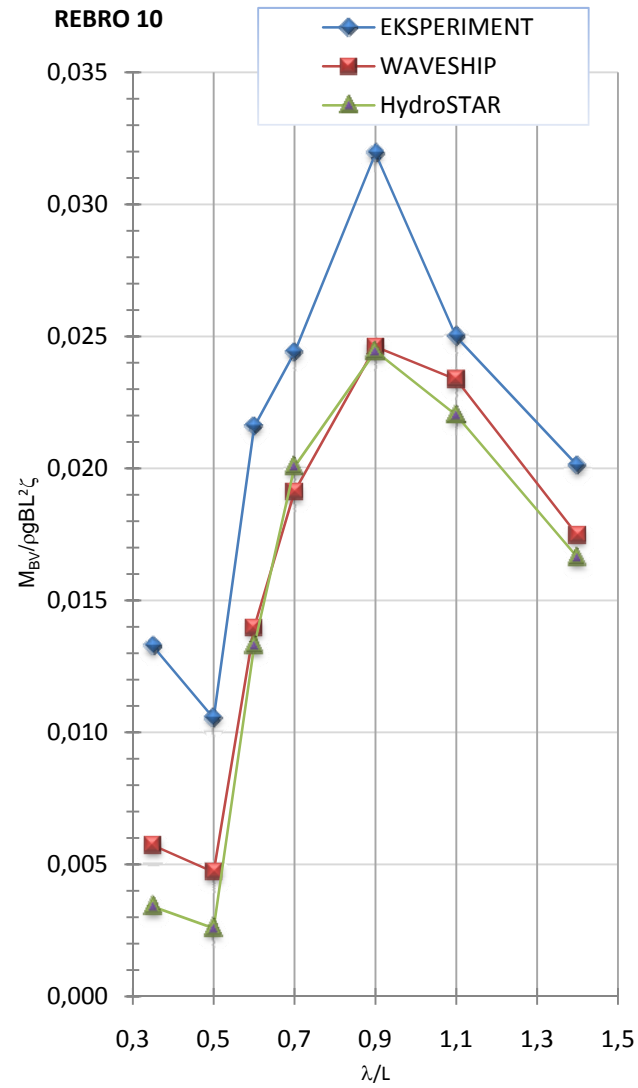
VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

$\mu = 180^\circ$ (valovi u pramac)

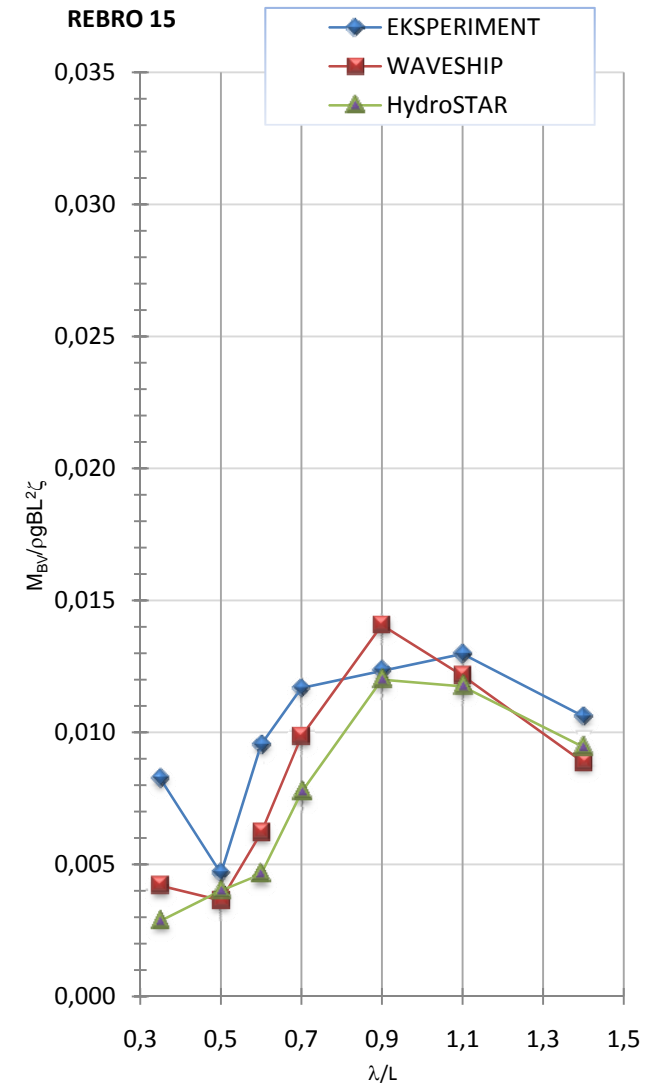
$Fn = 0.245$



Slika 10.

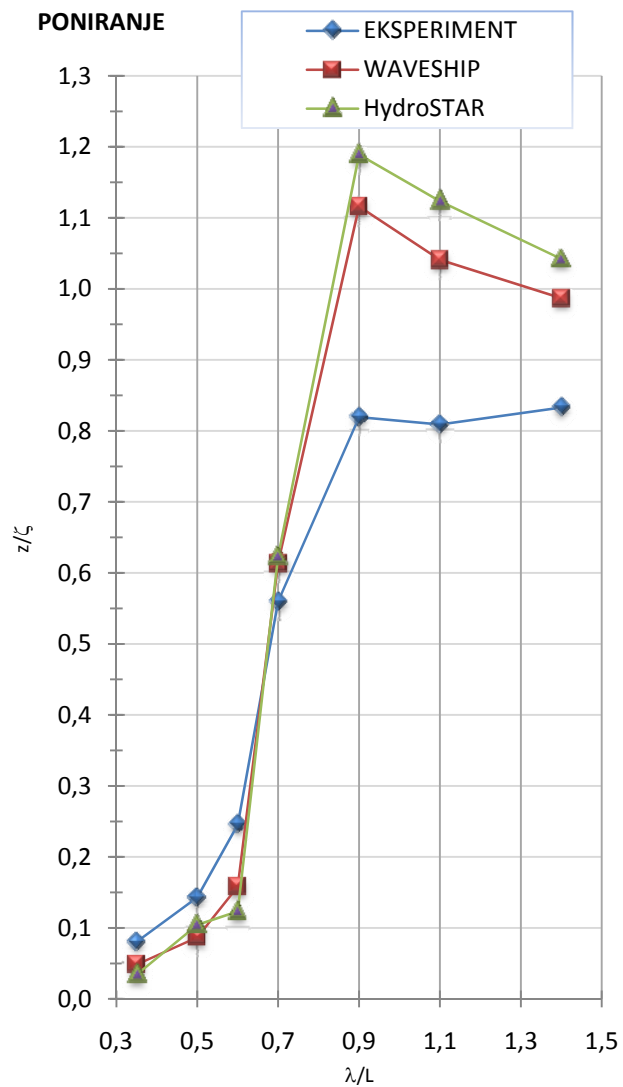


Slika 11.

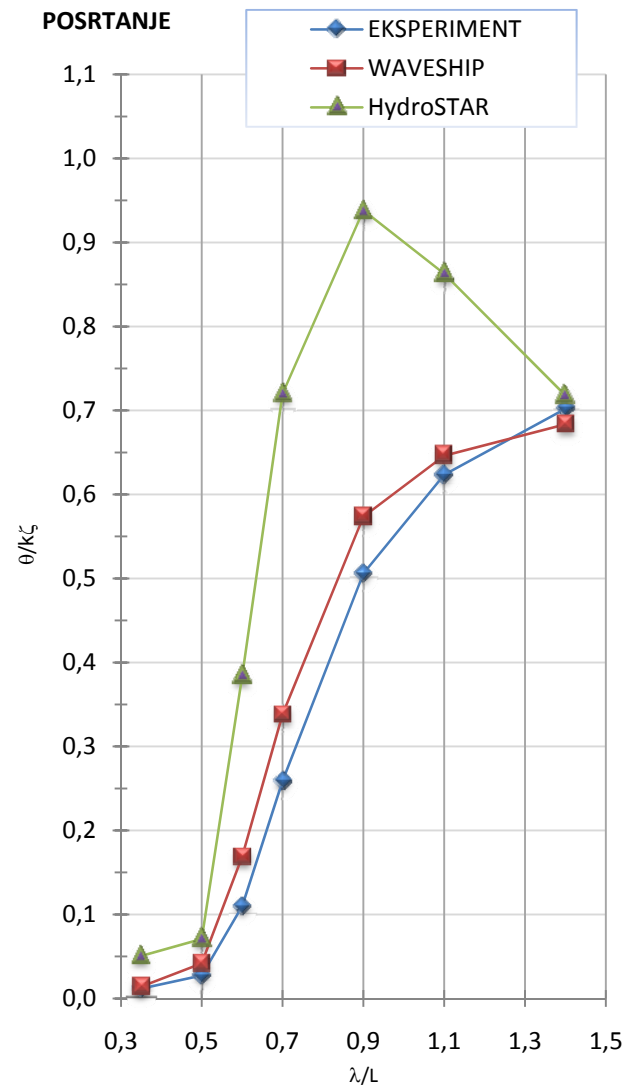


Slika 12.

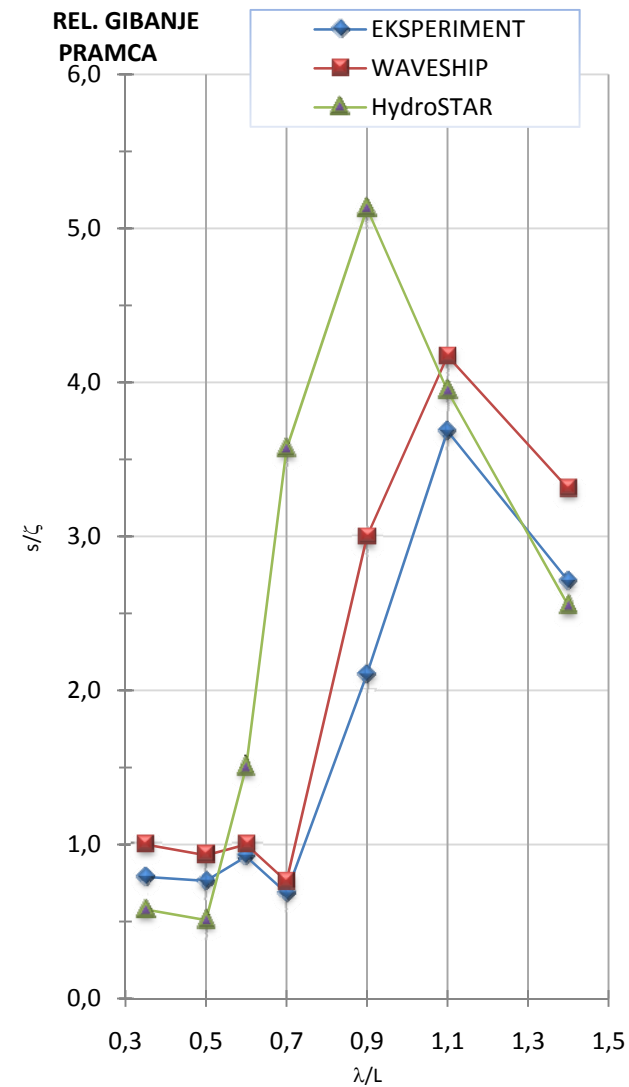
$\mu = 135^\circ$ (valovi bočno u pramac)
 $Fn = 0.245$



Slika 13.



Slika 14.

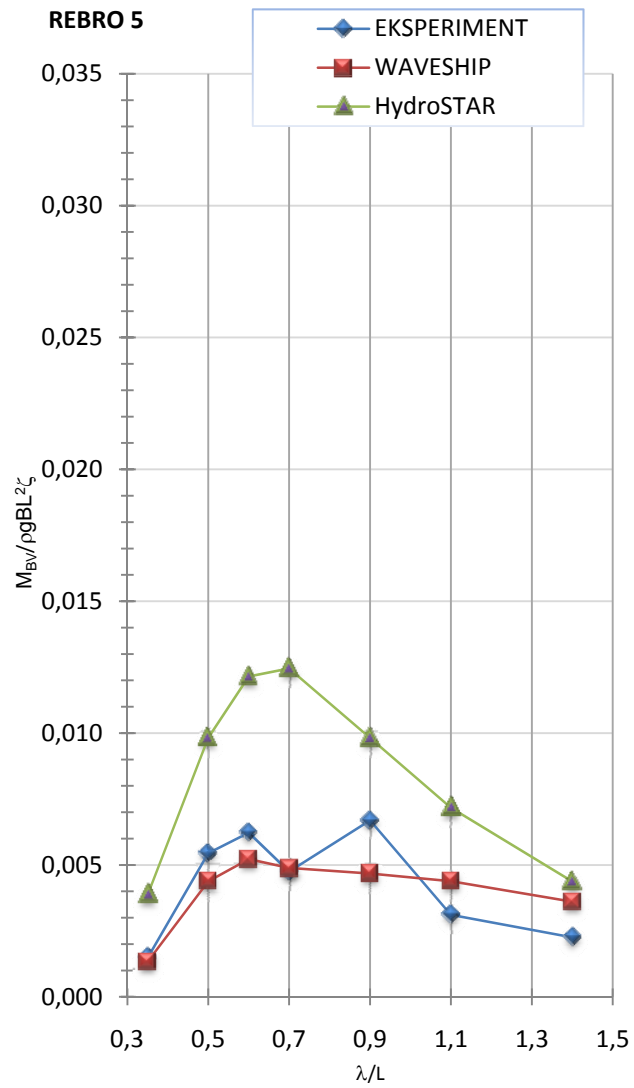


Slika 15.

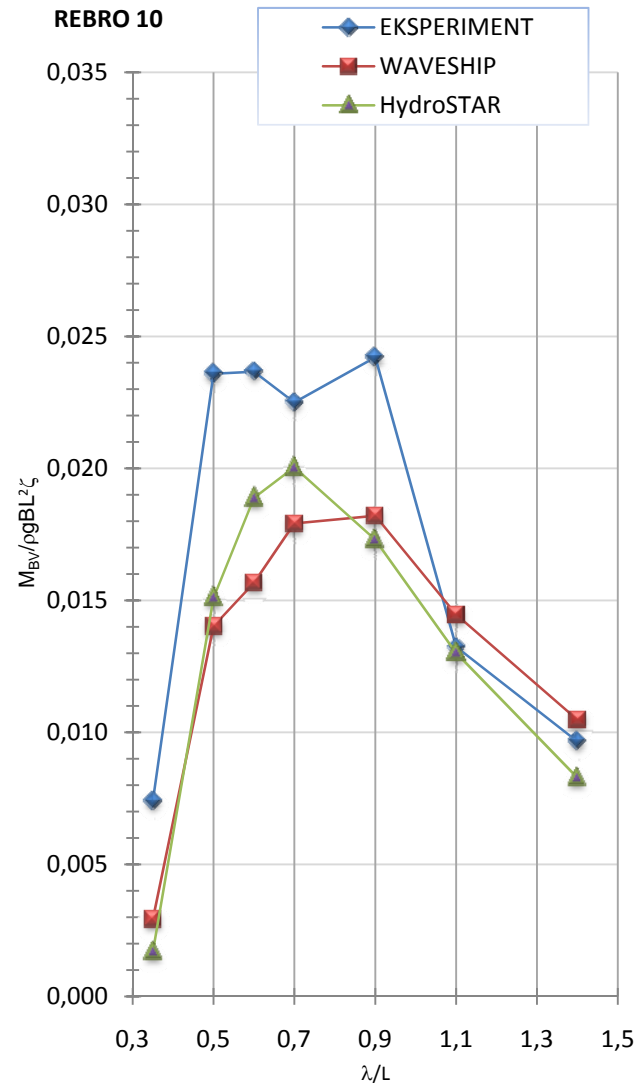
VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

$\mu = 135^\circ$ (valovi bočno u pramac)

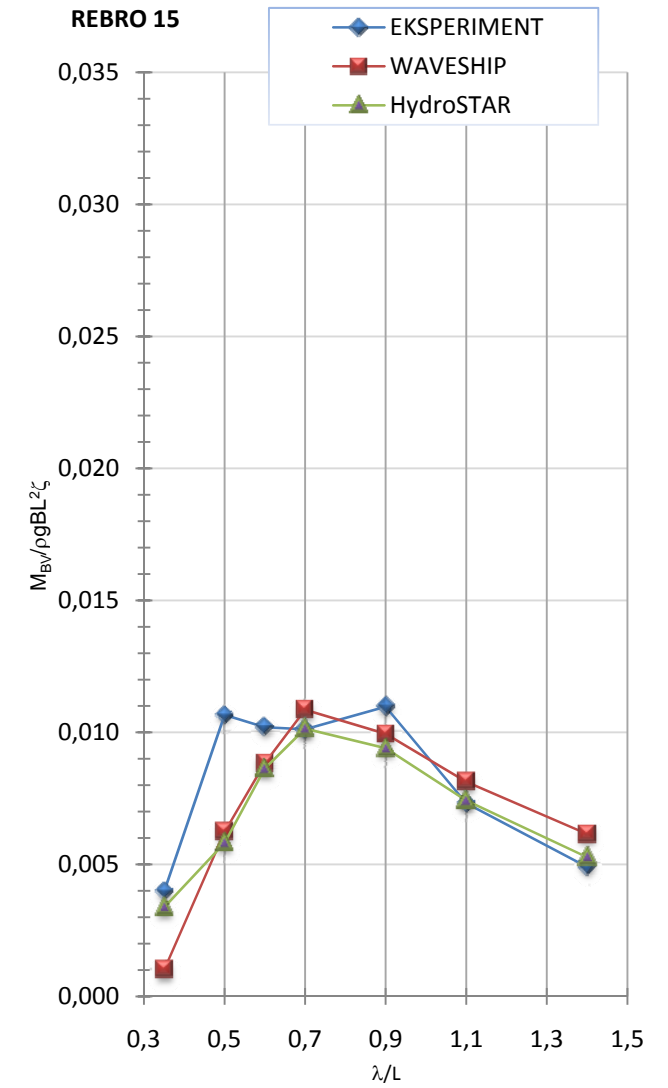
$Fn = 0.245$



Slika 16.

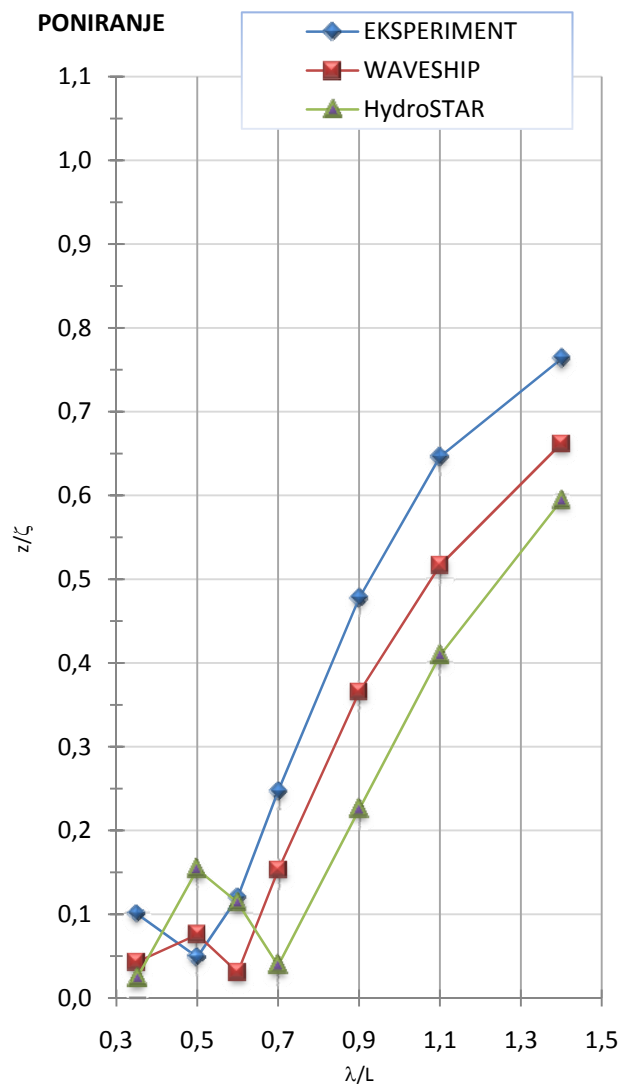


Slika 17.

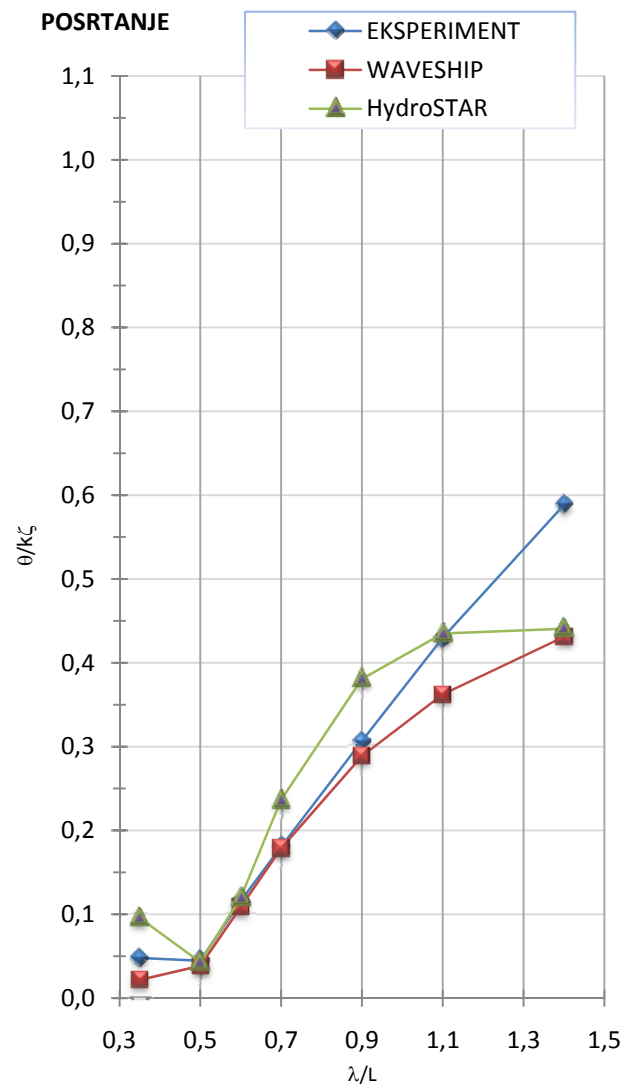


Slika 18.

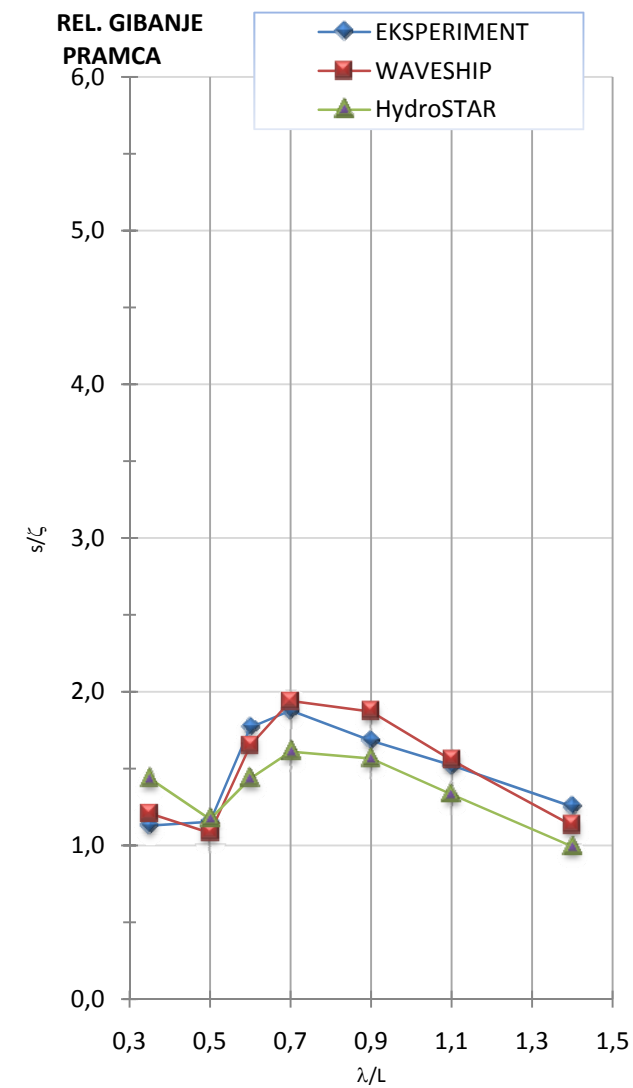
$\mu = 45^\circ$ (valovi bočno u krmu)
 $Fn = 0.245$



Slika 19.



Slika 20.

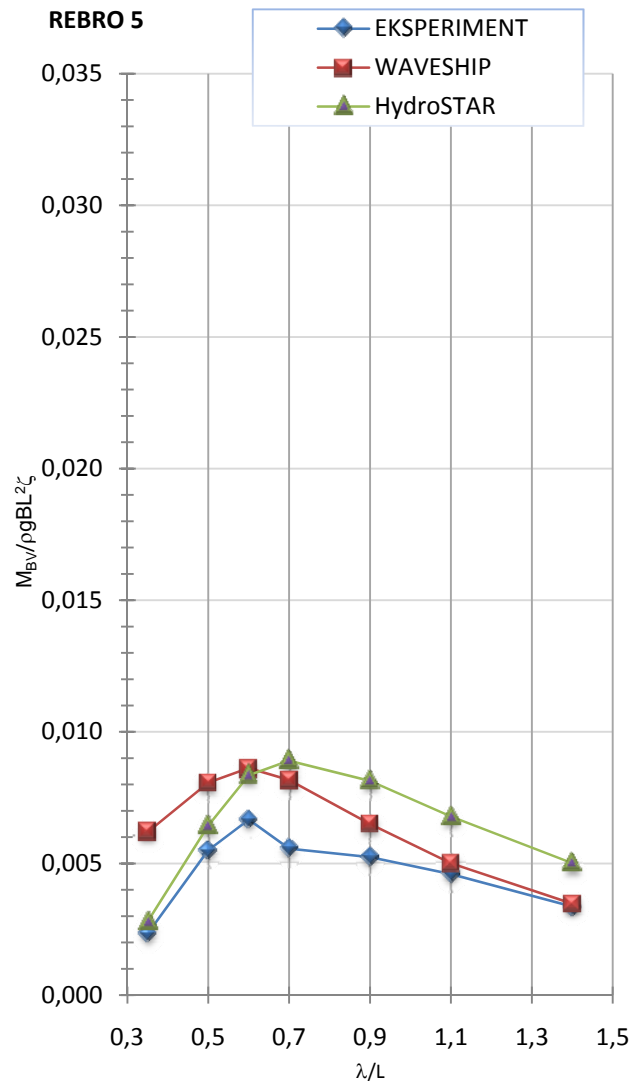


Slika 21.

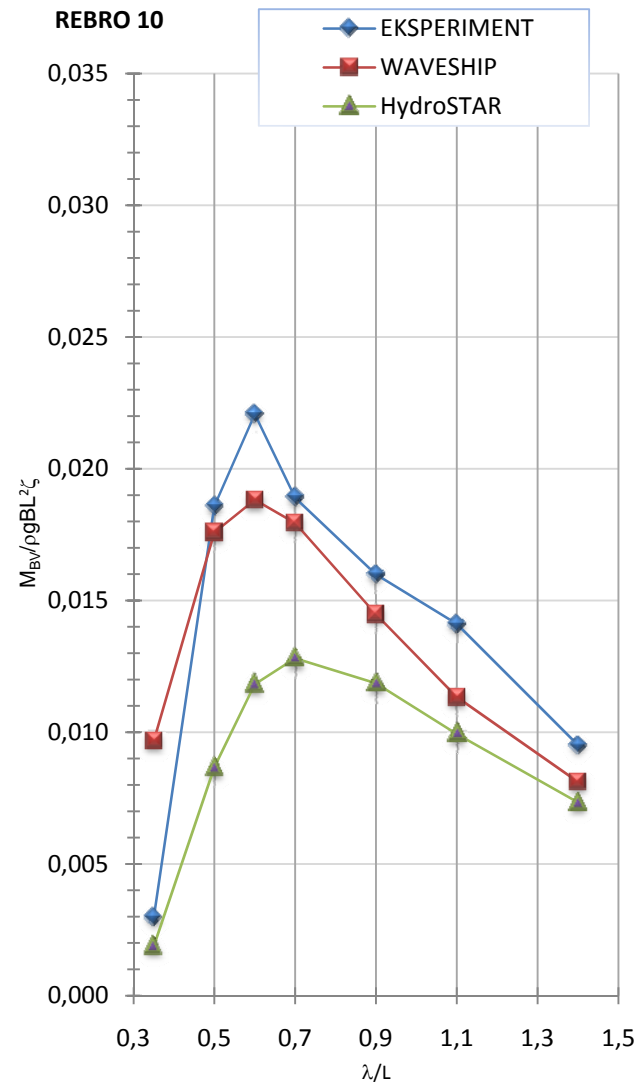
VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

$\mu = 45^\circ$ (valovi bočno u krmu)

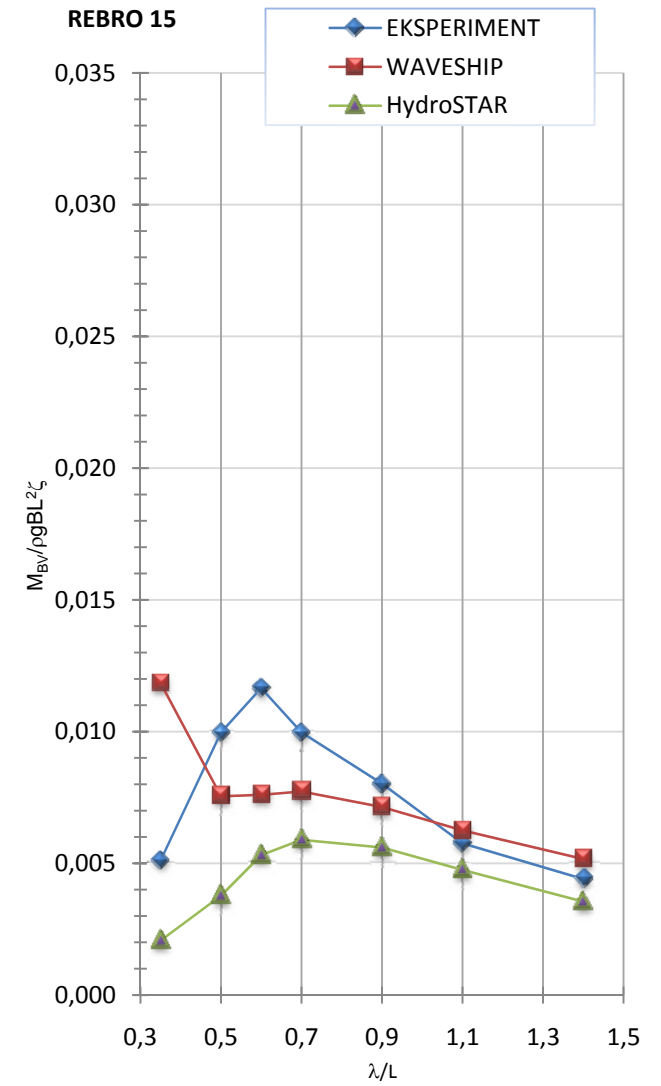
$Fn = 0.245$



Slika 22.



Slika 23.



Slika 24.

6.2 Usporedba rezultata HydroSTARa s drugim metodama

Rezultati dobiveni programom HydroSTAR su uspoređeni s dvjema dvodimenzionalnim vrpčastim metodama i jednom panelskom metodom [11].

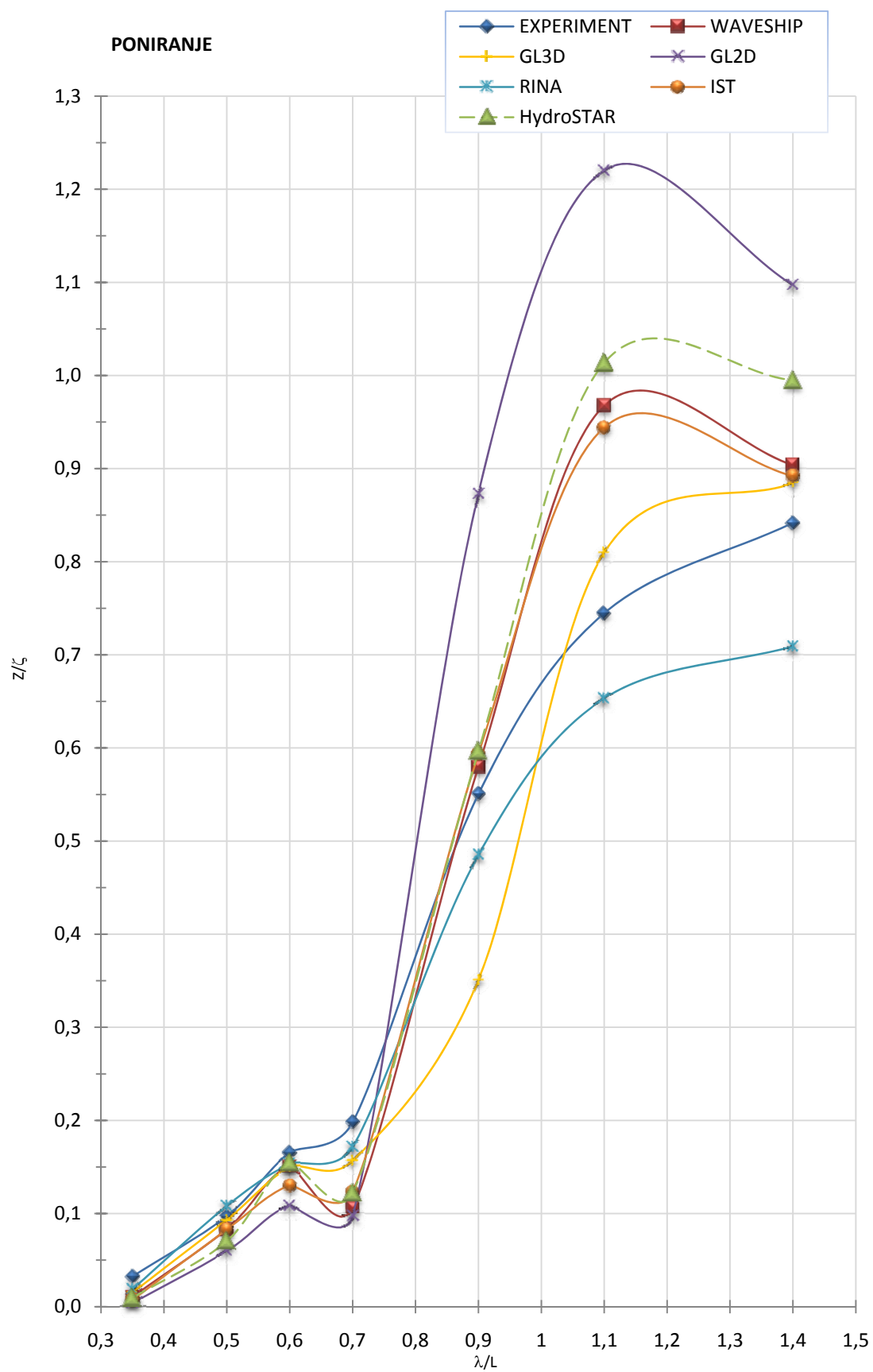
Proračuni vrpčaste teorije su izvršili "Registro Italiano Navale" (RINA), Fonseca i Guedes Soares za "Instituto Superio Tecnico" (IST) i Ostergaard i Shellin za Germanischer Lloyd (GL) [9].

Metode vrpčaste teorije RINA i IST su standardne metode temeljene na dokazanoj metodi Salvesen-a. Vrpčasta teorija GL je unaprijeđena metoda koja uključuje poboljšanu formulu za tlak koju je razvio Hachmann. Panelnu metodu GL su razvili Papanikolau i Schellin. Metoda efikasno rješava problem graničnih vrijednosti na temelju Greenove funkcije nulte brzine.

Usporedba rezultata HydroSTARa i gore navedenih metoda je prikazana u dijagramima na slikama 25. do 31..

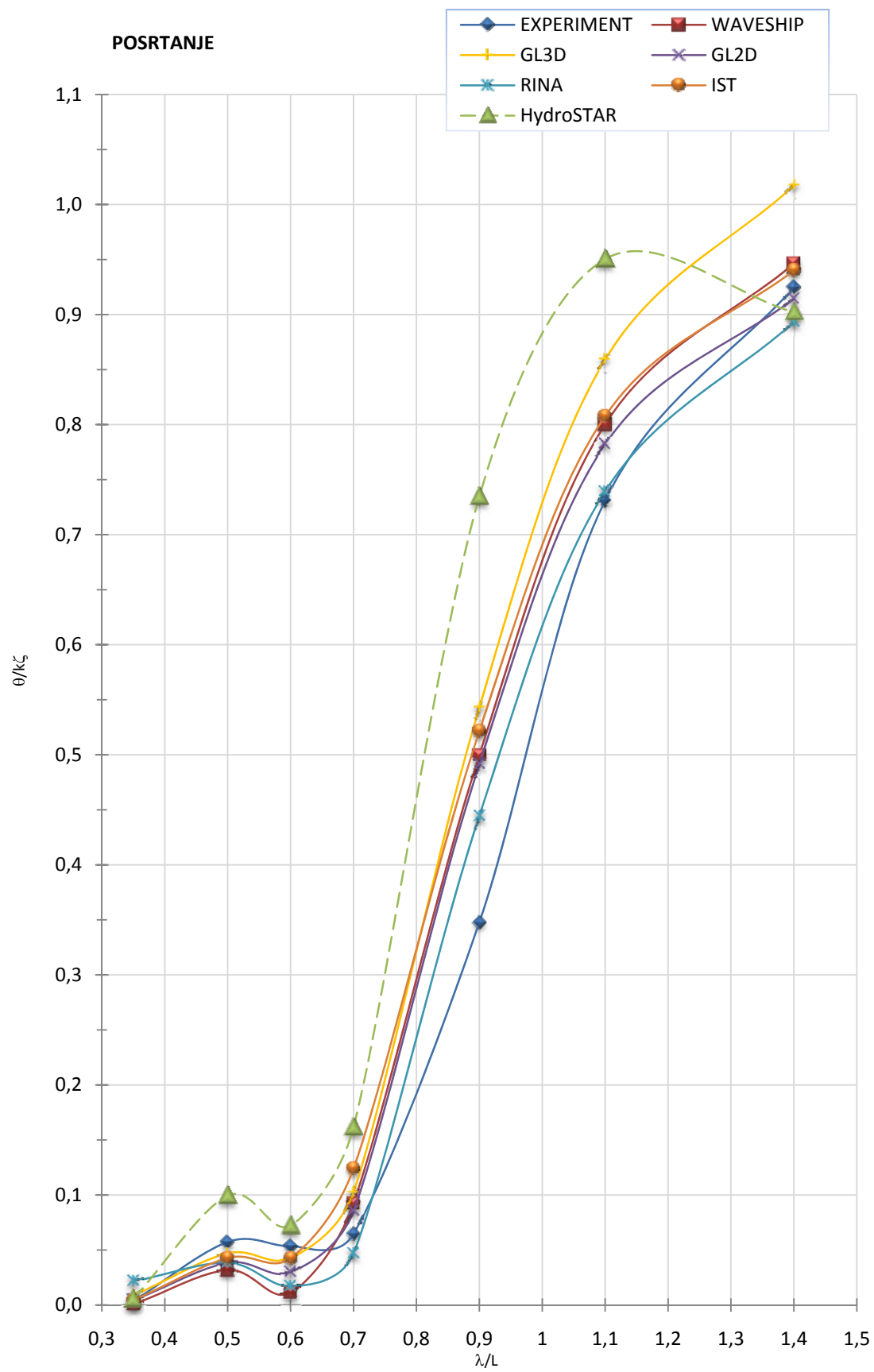
Krivulje koje prikazuju rezultate dobivene programom HydroSTAR se nalaze oko sredine područja dobivene drugim metodama.

$\mu = 180^\circ$
 $Fn = 0.245$



Slika 25.

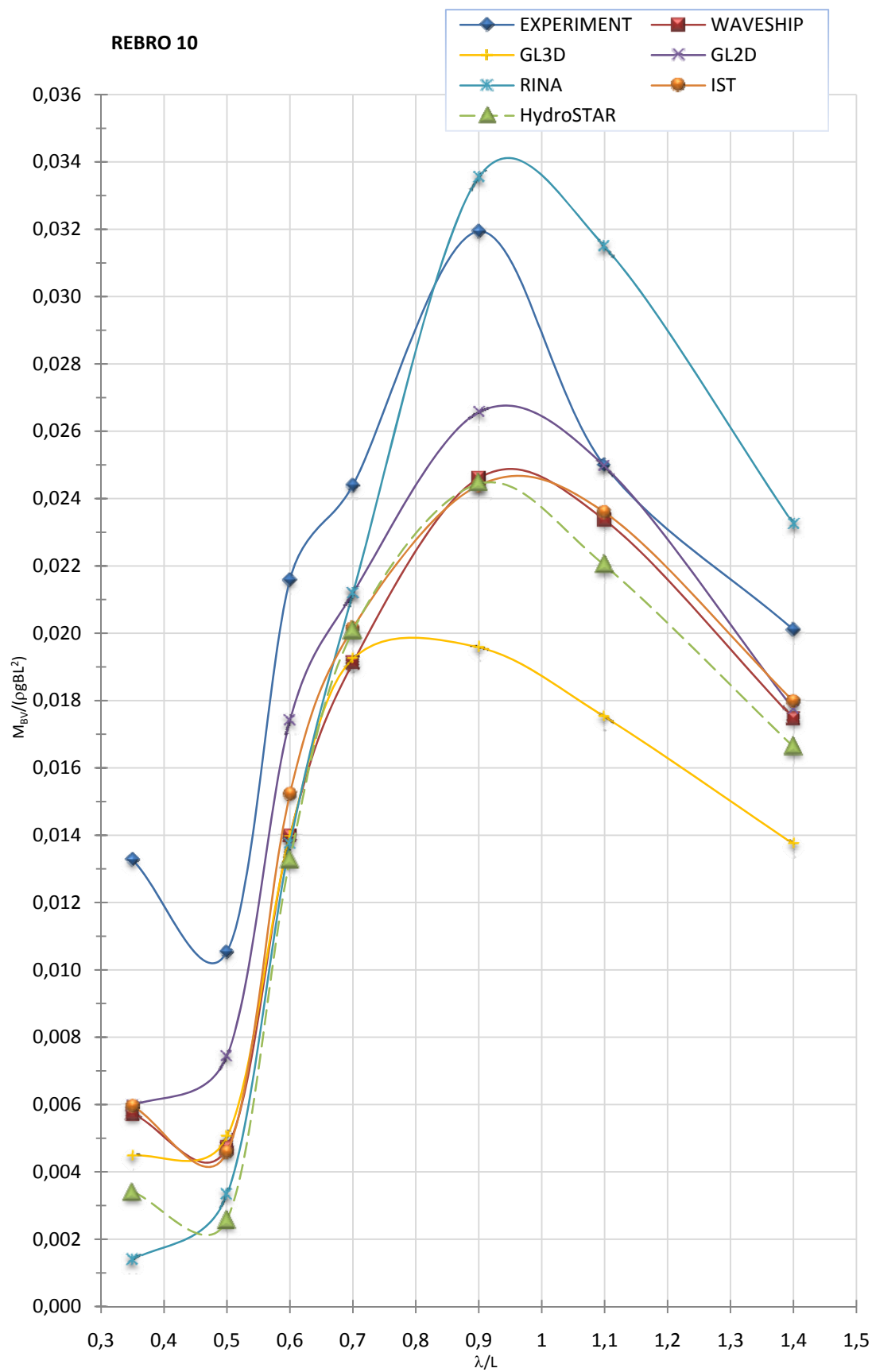
$\mu = 180^\circ$
 $Fn = 0.245$



Slika 26.

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

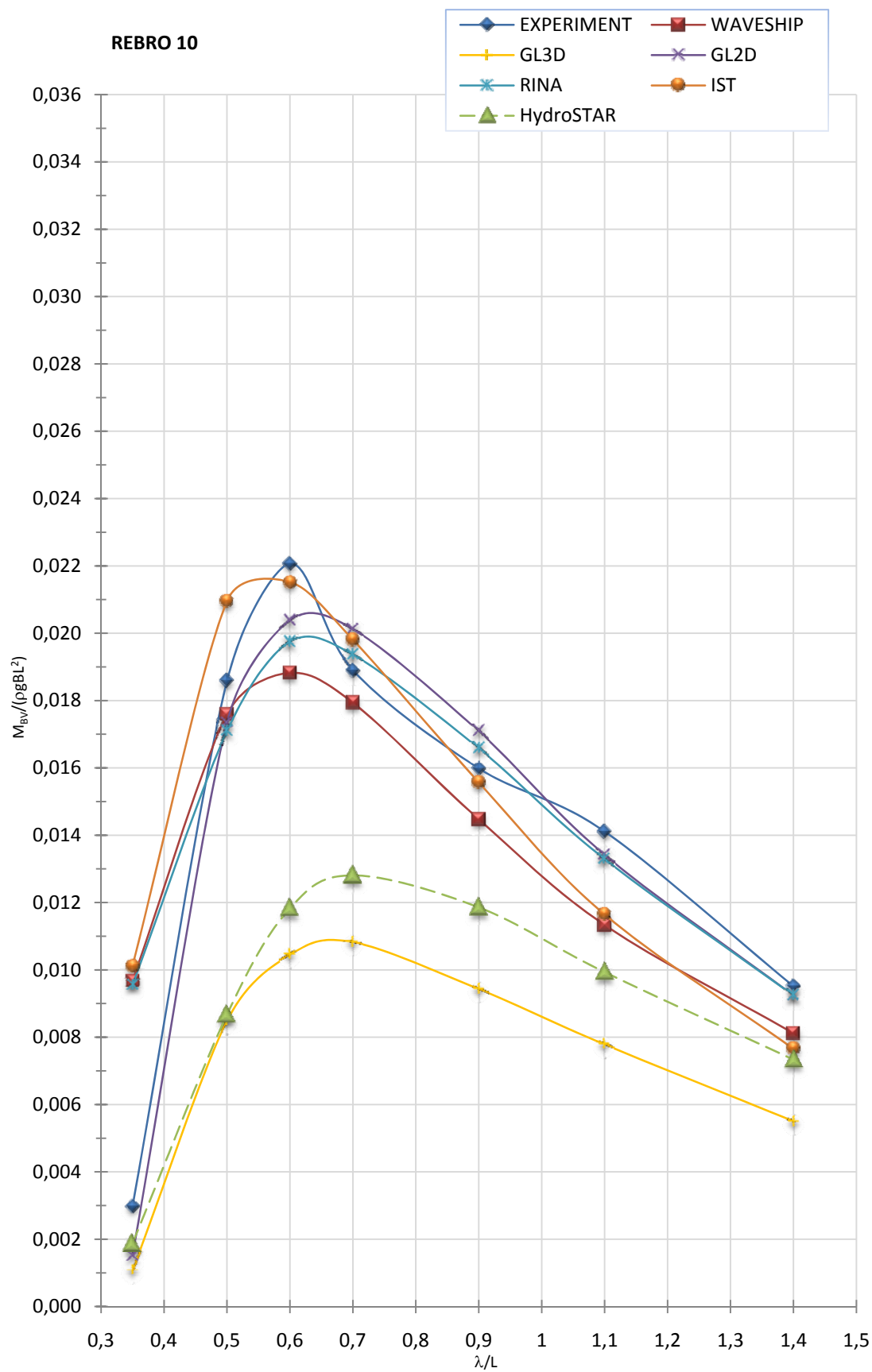
$\mu = 180^\circ$
 $Fn = 0.245$



Slika 27.

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

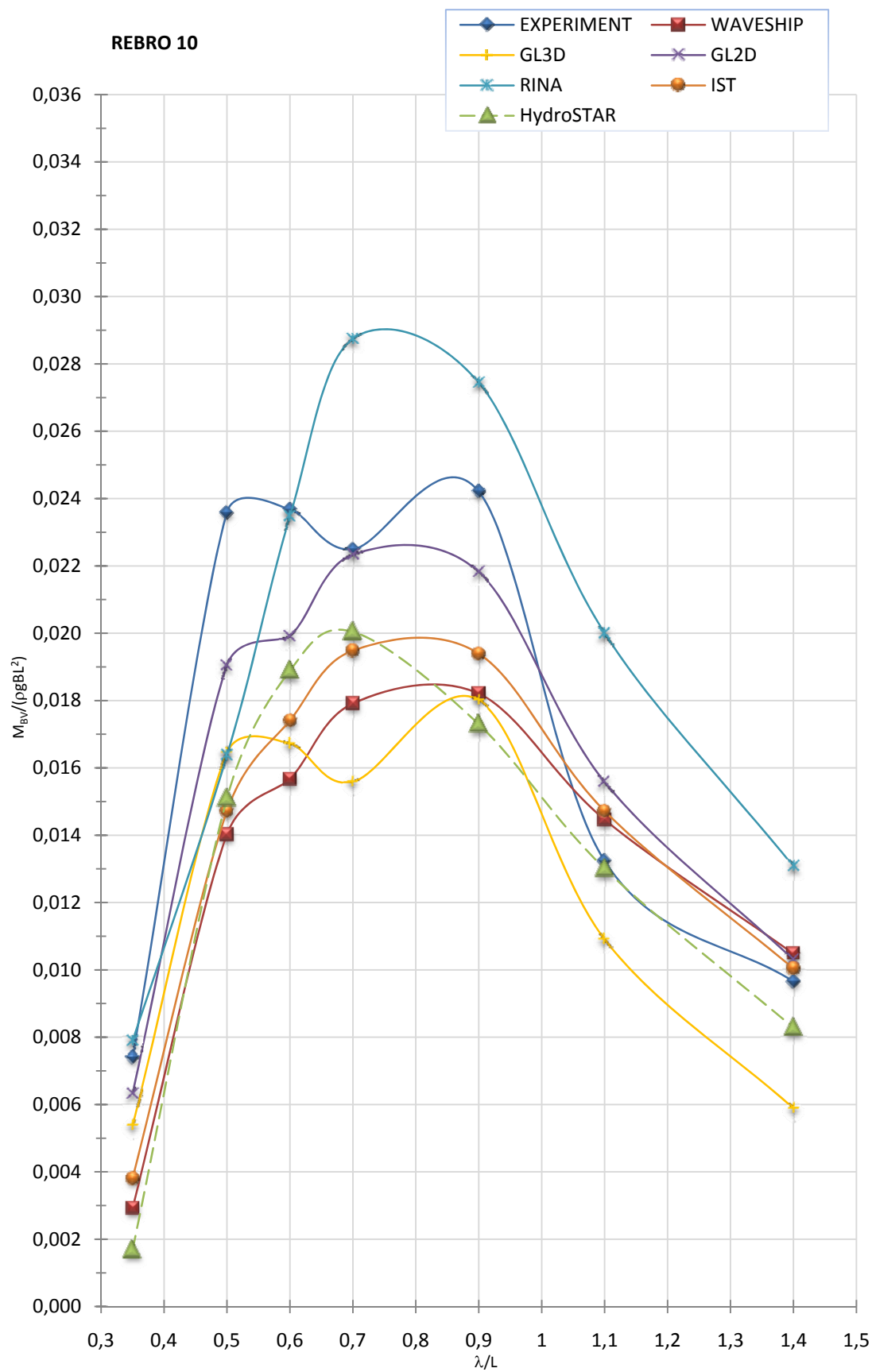
$\mu = 135^\circ$
 $Fn = 0.245$



Slika 28.

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

$\mu = 45^\circ$
 $Fn = 0.245$

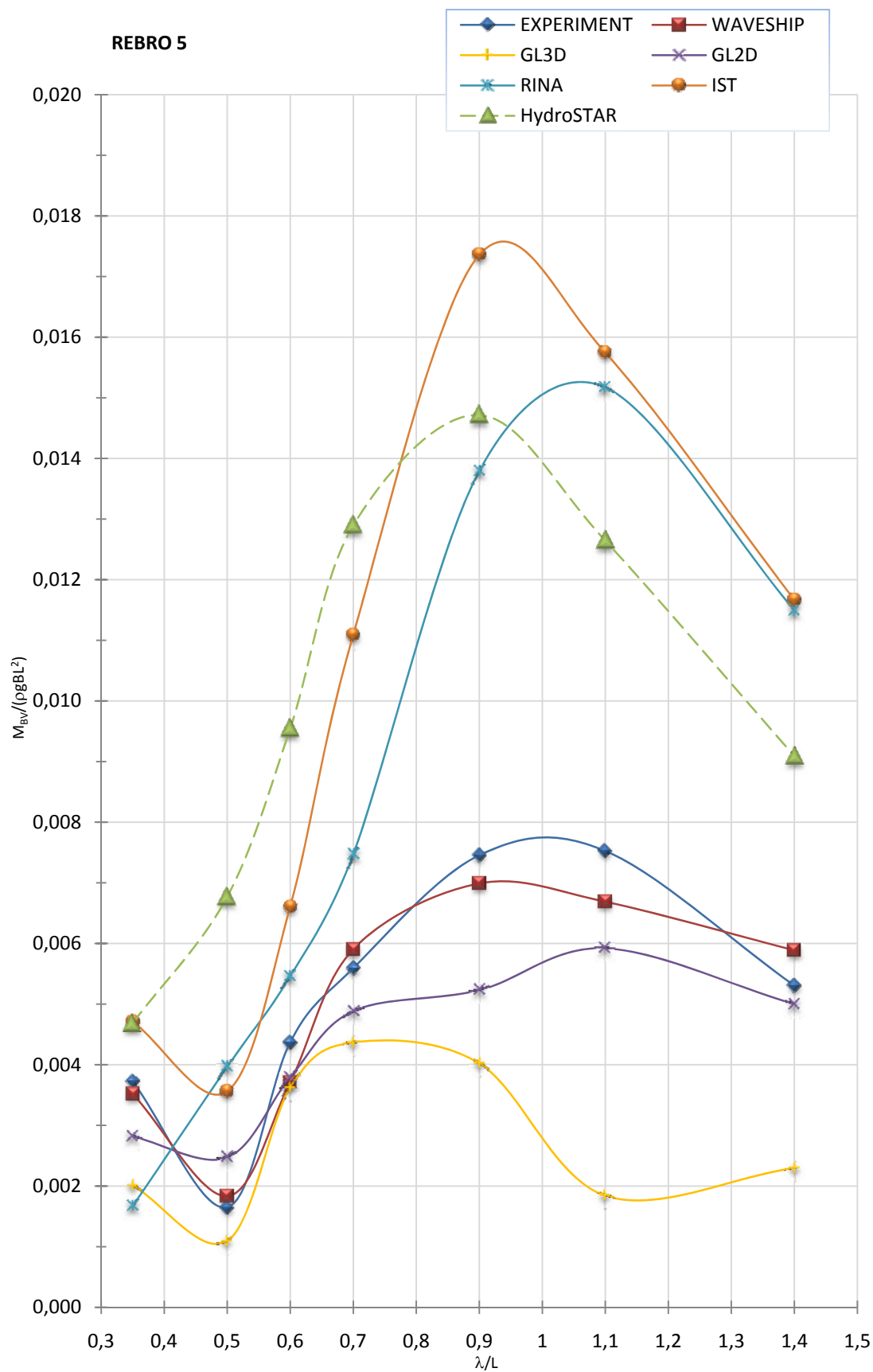


Slika 29.

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

$$\mu = 180^\circ$$

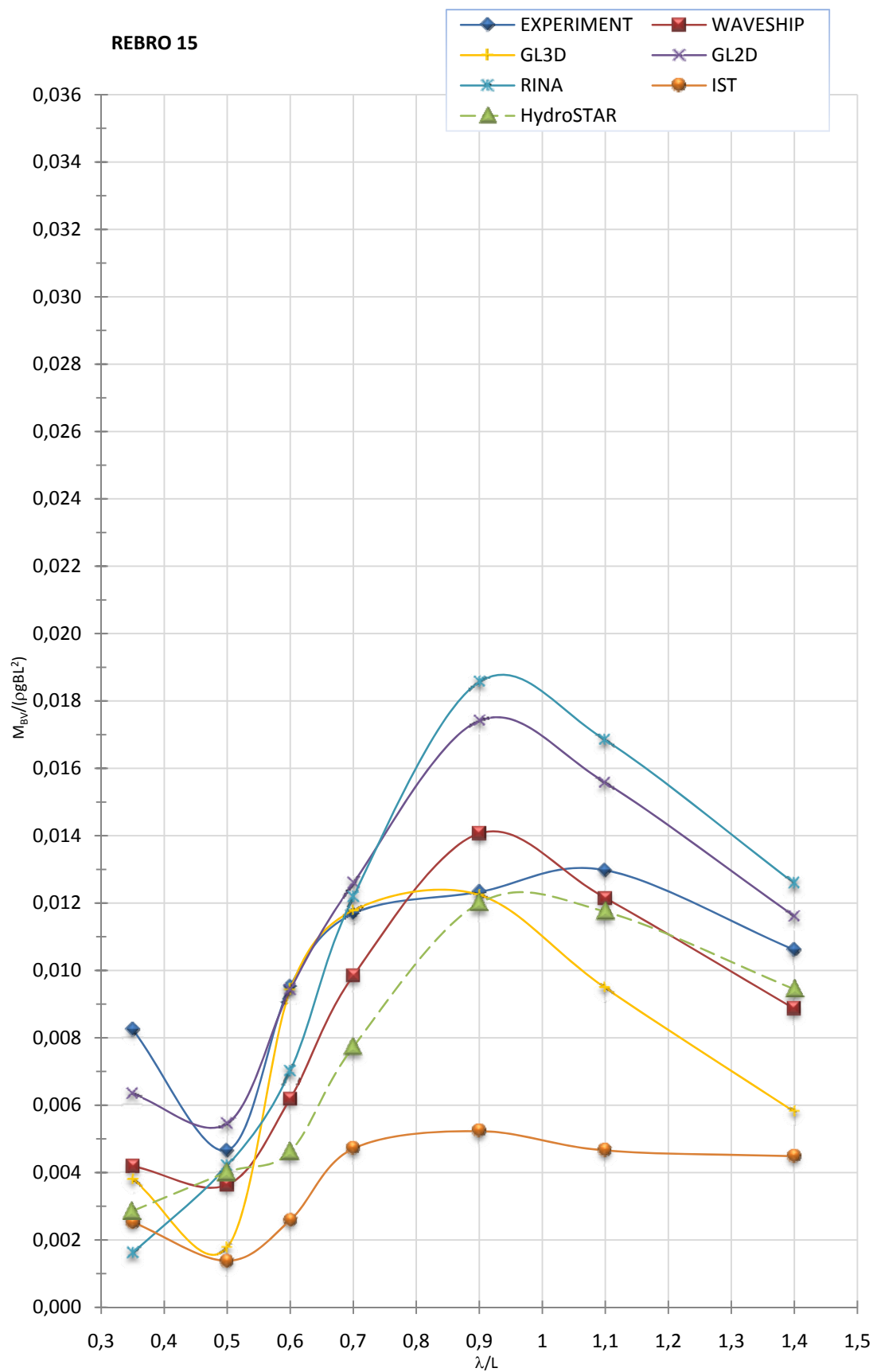
$$Fn = 0.245$$



Slika 30.

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA

$\mu = 180^\circ$
 $Fn = 0.245$



Slika 31.

6.3 Određivanje frekvencijski neovisne pogreške modeliranja za različite metode

U tablicama 3. do 20. su prikazane frekvencijski neovisne pogreške modeliranja koje su zanimljive za analizu točnosti različitih metoda pomorstvenosti.

Frekvencijska neovisna pogreška modeliranja je računana prema izrazu kojeg je propisao Guedes Soares [11].

$$\phi = \frac{\sum_{i=1} |H_{\text{eks}}(\omega_i)| |H(\omega_i)|}{\sum_i |H_{\text{eks}}(\omega_i)|^2}$$

PONIRANJE ($\mu = 180^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment z/ζ	Waveship z/ζ	HydroSTAR z/ζ
0.35	0.032	0.011	0.009
0.5	0.097	0.083	0.070
0.6	0.165	0.149	0.154
0.7	0.198	0.106	0.122
0.9	0.550	0.580	0.597
1.1	0.745	0.968	1.013
1.4	0.842	0.904	0.995
	$\phi =$	1.129	1.203

Tablica 3. Frekvencijski neovisna pogreška za poniranje pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$

POSRTANJE ($\mu = 180^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $\theta / k\zeta$	Waveship $\theta / k\zeta$	HydroSTAR $\theta / k\zeta$
0.35	0.004	0.001	0.006
0.5	0.057	0.032	0.099
0.6	0.054	0.011	0.072
0.7	0.065	0.092	0.162
0.9	0.348	0.500	0.734
1.1	0.731	0.800	0.950
1.4	0.925	0.946	0.902
	$\phi =$	1.080	1.186

Tablica 4. Frekvencijski neovisna pogreška za posrtanje pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$ RELATIVNO GIBANJE PRAMCA ($\mu = 180^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment s/ζ	Waveship s/ζ	HydroSTAR s/ζ
0.35	0.789	1.000	0.652
0.5	0.763	0.930	0.398
0.6	0.921	1.000	0.667
0.7	0.684	0.760	0.387
0.9	2.105	3.000	3.577
1.1	3.684	4.172	5.227
1.4	2.711	3.310	4.091
	$\phi =$	1.205	1.420

Tablica 5. Frekvencijski neovisna pogreška za relativno gibanje pramca pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R5 ($\mu = 180^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0037	0.0035	0.0047
0.5	0.0016	0.0018	0.0068
0.6	0.0044	0.0037	0.0095
0.7	0.0056	0.0059	0.0129
0.9	0.0075	0.0070	0.0147
1.1	0.0075	0.0067	0.0126
1.4	0.0053	0.0059	0.0091
	$\phi =$	0.960	1.908

Tablica 6. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R5 pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R10 ($\mu = 180^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0133	0.0057	0.0034
0.5	0.0105	0.0047	0.0026
0.6	0.0216	0.0140	0.0133
0.7	0.0244	0.0191	0.0201
0.9	0.0319	0.0246	0.0244
1.1	0.0250	0.0234	0.0220
1.4	0.0201	0.0175	0.0166
	$\phi =$	0.770	0.740

Tablica 7. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R10 pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R15 ($\mu = 180^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho g B L^2$	Waveship $M_{BV}/\rho g B L^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho g B L^2$
0.35	0.0082	0.0042	0.0029
0.5	0.0047	0.0036	0.0040
0.6	0.0095	0.0062	0.0046
0.7	0.0117	0.0098	0.0077
0.9	0.0123	0.0141	0.0120
1.1	0.0130	0.0122	0.0117
1.4	0.0106	0.0089	0.0094
	$\phi =$	0.868	0.769

Tablica 8. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R15 pri $\mu = 180^\circ$ i $F_n = 0.245$

PONIRANJE ($\mu = 135^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment z/ζ	Waveship z/ζ	HydroSTAR z/ζ
0.35	0.080	0.048	0.034
0.5	0.143	0.087	0.104
0.6	0.245	0.158	0.123
0.7	0.560	0.614	0.623
0.9	0.819	1.116	1.189
1.1	0.809	1.041	1.124
1.4	0.833	0.987	1.042
	$\phi =$	1.230	1.301

Tablica 9. Frekvencijski neovisna pogreška za poniranje pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$

POSRTANJE ($\mu = 135^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $\theta/k\zeta$	Waveship $\theta/k\zeta$	HydroSTAR $\theta/k\zeta$
0.35	0.012	0.014	0.051
0.5	0.027	0.042	0.071
0.6	0.110	0.169	0.384
0.7	0.259	0.338	0.720
0.9	0.506	0.574	0.938
1.1	0.624	0.646	0.863
1.4	0.702	0.683	0.718
	$\phi =$	1.052	1.436

Tablica 10. Frekvencijski neovisna pogreška za posrtanje pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$

RELATIVNO GIBANJE PRAMCA ($\mu = 135^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment s/ζ	Waveship s/ζ	HydroSTAR s/ζ
0.35	0.820	0.894	0.577
0.5	0.685	0.793	0.509
0.6	1.468	1.463	1.503
0.7	2.581	2.827	3.568
0.9	3.180	3.904	5.131
1.1	2.398	3.094	3.945
1.4	1.505	2.069	2.550
	$\phi =$	1.199	1.490

Tablica 11. Frekvencijski neovisna pogreška za relativno gibanje pramca pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R5 ($\mu = 135^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0015	0.0013	0.0039
0.5	0.0054	0.0044	0.0098
0.6	0.0062	0.0052	0.0121
0.7	0.0047	0.0049	0.0125
0.9	0.0067	0.0047	0.0098
1.1	0.0031	0.0044	0.0072
1.4	0.0023	0.0036	0.0044
	$\phi =$	0.882	1.911

Tablica 12. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R5 pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R10 ($\mu = 135^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0074	0.0029	0.0017
0.5	0.0236	0.0140	0.0151
0.6	0.0237	0.0157	0.0189
0.7	0.0225	0.0179	0.0200
0.9	0.0242	0.0182	0.0173
1.1	0.0132	0.0145	0.0130
1.4	0.0097	0.0105	0.0083
	$\phi =$	0.734	0.765

Tablica 13. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R10 pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R15 ($\mu = 135^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho g B L^2$	Waveship $M_{BV}/\rho g B L^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho g B L^2$
0.35	0.0040	0.0010	0.0034
0.5	0.0107	0.0062	0.0058
0.6	0.0102	0.0088	0.0086
0.7	0.0101	0.0109	0.0101
0.9	0.0110	0.0099	0.0094
1.1	0.0073	0.0081	0.0074
1.4	0.0049	0.0062	0.0053
	$\phi =$	0.879	0.842

Tablica 14. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R15 pri $\mu = 135^\circ$ i $F_n = 0.245$

PONIRANJE ($\mu = 45^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment z/ζ	Waveship z/ζ	HydroSTAR z/ζ
0.35	0.101	0.043	0.023
0.5	0.049	0.076	0.154
0.6	0.120	0.031	0.114
0.7	0.247	0.153	0.039
0.9	0.477	0.365	0.225
1.1	0.646	0.516	0.409
1.4	0.763	0.662	0.594
	$\phi =$	0.808	0.652

Tablica 15. Frekvencijski neovisna pogreška za poniranje pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$

POSRTANJE ($\mu = 45^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $\theta / k\zeta$	Waveship $\theta / k\zeta$	HydroSTAR $\theta / k\zeta$
0.35	0.048	0.022	0.096
0.5	0.045	0.039	0.043
0.6	0.116	0.109	0.120
0.7	0.181	0.179	0.236
0.9	0.307	0.289	0.381
1.1	0.430	0.362	0.435
1.4	0.588	0.431	0.441
	$\phi =$	0.808	0.927

Tablica 16. Frekvencijski neovisna pogreška za posrtanje pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$

RELATIVNO GIBANJE PRAMCA ($\mu = 45^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment s/ζ	Waveship s/ζ	HydroSTAR s/ζ
0.35	1.129	1.208	1.436
0.5	1.153	1.081	1.170
0.6	1.767	1.651	1.435
0.7	1.877	1.940	1.610
0.9	1.681	1.870	1.565
1.1	1.521	1.555	1.332
1.4	1.252	1.129	2.550
	$\phi =$	1.008	1.026

Tablica 17. Frekvencijski neovisna pogreška za relativno gibanje pramca pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R5 ($\mu = 45^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0023	0.0062	0.0028
0.5	0.0055	0.0081	0.0064
0.6	0.0067	0.0086	0.0083
0.7	0.0056	0.0082	0.0089
0.9	0.0052	0.0065	0.0081
1.1	0.0046	0.0050	0.0068
1.4	0.0034	0.0035	0.0050
	$\phi =$	1.348	1.390

Tablica 18. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R5 pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$

VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R10 ($\mu = 45^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0030	0.0097	0.0019
0.5	0.0186	0.0176	0.0087
0.6	0.0221	0.0188	0.0118
0.7	0.0189	0.0179	0.0128
0.9	0.0160	0.0145	0.0119
1.1	0.0141	0.0113	0.0099
1.4	0.0095	0.0081	0.0073
	$\phi =$	0.905	0.613

Tablica 19. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R10 pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$

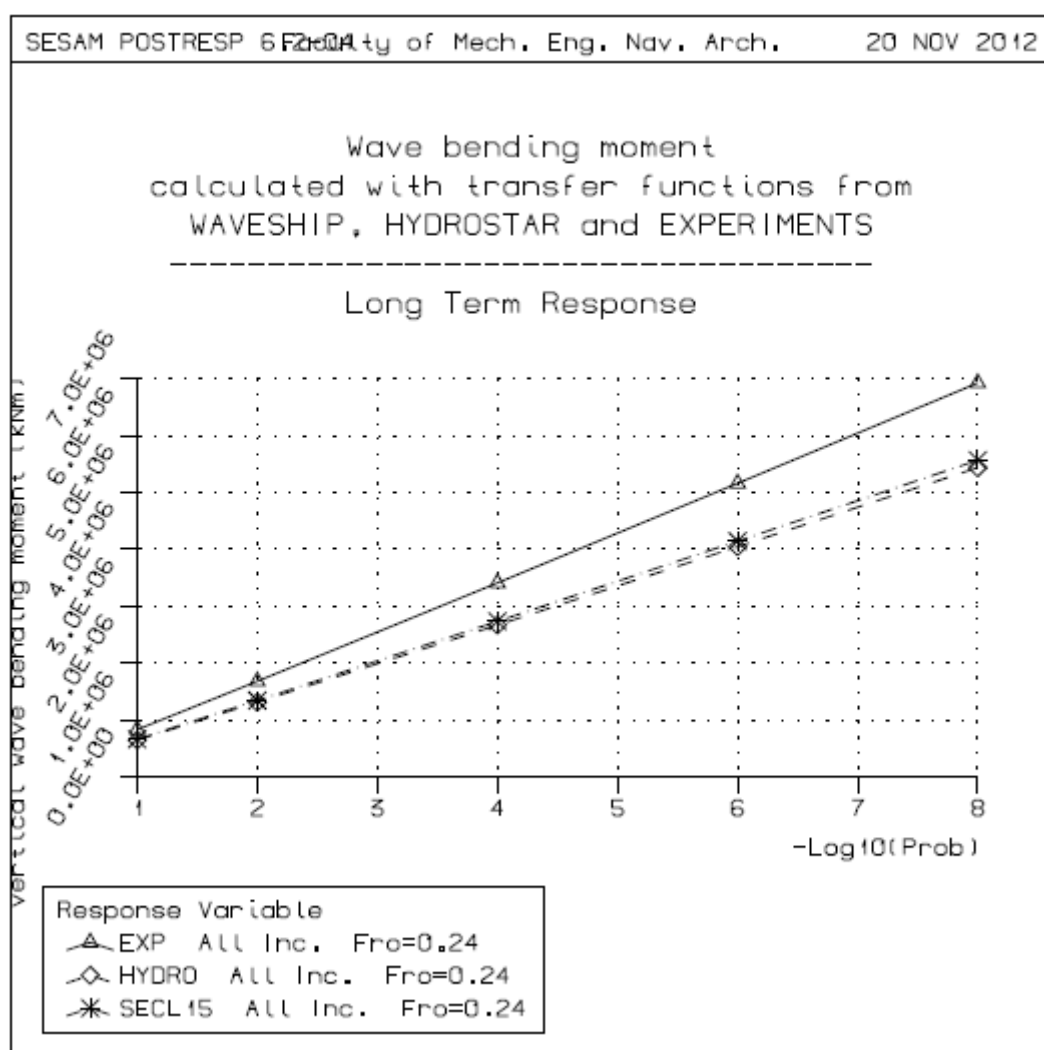
VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA NA R15 ($\mu = 45^\circ$, $F_n = 0.245$)

λ/L	Eksperiment $M_{BV}/\rho gBL^2$	Waveship $M_{BV}/\rho gBL^2$	HydroSTAR $M_{BV}/\rho gBL^2$
0.35	0.0051	0.0118	0.0021
0.5	0.0100	0.0075	0.0038
0.6	0.0117	0.0076	0.0053
0.7	0.0100	0.0077	0.0059
0.9	0.0080	0.0071	0.0056
1.1	0.0058	0.0062	0.0048
1.4	0.0044	0.0052	0.0035
	$\phi =$	0.874	0.537

Tablica 20. Frekvencijski neovisna pogreška za vertikalni moment savijanja na R15 pri $\mu = 45^\circ$ i $F_n = 0.245$

6.4 Dugoročna razdioba vertikalnih momenata savijanja dobivenih s različitim metodama i usporedba ekstremnih vrijednosti s pravilima IACSa.

Konstrukcijom dugoročne razdiobe vertikalnog valnog momenta savijanja može se steći uvid u posljedice greške modeliranja na ekstremne vrijednosti momenta savijanja. Napravljena je i usporedba dugoročnih razdioba vertikalnih valnih momenta savijanja dobivenih različitim metodama kao i usporedba ekstremnih vrijednosti s pravilima IACSa, slika 32..



Slika 32.

Sa slike 32. se vidi da su vertikalni valni momenti savijanja određeni vrpčastom i 3D panel metodom približno jednaki i da potcjenjuju momente određene na osnovi izmjerenih prijenosnih funkcija za oko 27%.

Prema registru Det Norske Veritas izraz za moment savijanja na valovima glasi

- za brod na valnom brijegu

$$M_{WV,H} = 190 F_M n C L^2 B C_B 10^{-3} \text{ [kN]}$$

$$M_{WV,H} = 190 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10.586 \cdot 270^2 \cdot 32.2 \cdot 0.598 \cdot 10^{-3} = 2823384.815 \text{ [kN]}$$

$$F_M = 1$$

$$n = 1$$

$$C = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{3/2} = 10.75 - \left(\frac{300 - 270}{100} \right)^{3/2} = 10.586$$

- za brod na valnom dolu

$$M_{WV,S} = -110 F_M n C L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} \text{ [kN]}$$

$$M_{WV,S} = -110 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10.586 \cdot 270^2 \cdot 32.2 \cdot (0.598 + 0.7) \cdot 10^{-3} = 3547992.289 \text{ [kN]}$$

Mi uzimamo srednju vrijednost ova dva momenta

$$M_{WV} = \frac{M_{WV,H} + M_{WV,S}}{2} = \frac{2823384.815 + 3547992.289}{2} = 3185688.552 \text{ [kN]}$$

Programima HydroSTAR i Starspec je određen valni moment savijanja na rebru 10 (sredina broda), izračunat prema uputama IACSa [1], te iznosi $0.4059 \cdot 10^8$ N. Ova vrijednost je cca. 27% veća od projektnog vertikalnog valnog momenta savijanja iz pravila klasifikacijskih društava.

7. ZAKLJUČAK

U radu je izvršena usporedba različitih metoda za određivanje prijenosnih funkcija njihanja i opterećenja kontejnerskog broda na valovima. Razmatran je poznati Flokstrin kontejnerski brod za kojeg postoje izmjerene prijenosne funkcije. U ovom diplomskom radu je izrađen hidrodinamički model u programu HydroSTAR, dok su prijenosne funkcije vrpčaste metode određene u jednom prethodnom diplomskom radu.

Usporedba rezultata je pokazala da 3D panel metoda daje uglavnom dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima, kao i s vrpčastom metodom. Da bi se ustanovilo koja je od numeričkih metoda za analizu pomorstvenosti bolja, korištena je tzv. frekvencijski neovisna pogreška prijenosnih funkcija. Zanimljivo je da je najbolja vrijednost ovog parametra pogreške postignuta za relativno gibanje pramca, pri kutu nailaska 45° . U tom slučaju i vrpčasta metoda i 3D panel metoda skoro u potpunosti slijede izmjerenu prijenosnu funkciju. Nasuprot tome, valni moment savijanja na krmenom dijelu broda određen 3D metodom značajno precjenjuje izmjerene vrijednosti. Zanimljivo je da vrpčasta metoda nema tako drastičnih odstupanja od eksperimentalnih rezultata.

Dugoročna razdioba valnih momenata savijanja glavnog rebra pokazuje da se vrpčastom i 3D metodom dobiju približno iste razdiobe, a obje znatno potcjenjuju dugoročnu razdiobu određenu koristeći izmjerene prijenosne funkcije. Također, određen je ekstremni valni moment savijanja za vjerojatnost premašivanja 10^{-8} , prema uputama IACSa. Taj moment je za oko 27% veći od projektnog valnog momenta savijanja iz pravila klasifikacijskih društava.

PRILOZI

I. CD-R disc

LITERATURA

- [1] IACS: Recommendation No.34. Standard Wave Data. Rev.1, 2000.
- [2] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: Pomorstvenost plovinh objekata, Sveučilište u Rijeci, 2006.
- [3] Senjanović, I., Tomašević, S., Parunov, J.: Ship Slamming and Whipping in the Rough sea, Brodogradnja, pp 45-55, Issue 51, 2003.
- [4] Islam, M.N., Islam, M. R., Baree, M. S.: Computation of ship responses in waves using panel method, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, pp 35-46, December, 2004.
- [5] Bureau Veritas: HydroSTAR User Manual, 2010.
- [6] Bureau Veritas: StarSpec User Manual, 2010.
- [7] Parunov, J.: Osnove oceanologije, Prikaznice s predavanja, FSB, 2011.
- [8] Flokstra, C.: Comparison of ship motion theories with experiments containership, Int. Shipbild.Progr., 21, pp 168-189, 1974.
- [9] Schellin, T.E. Ostergaard, C. Guedes Soares C.: Uncertainty Assessment of Low Frequency Load Effects for Containerships, Marine structures, 9, pp 313-322, 1996.
- [10] Hitrec, M.: Analiza proračunatog i izmjerenog valnog opterećenja kontejnerskog broda, Diplomski rad, FSB, 1999.
- [11] Guedes Soares, C.: Effect of Transfer Function Uncertainty on Short-term Ship Responses, Ocean Engineering, Vol.18, No.4, pp 329-362, 1991.